



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE MINAS

PROYECTO FIN DE CARRERA

DEPARTAMENTO DE FÍSICA APLICADA A LOS RECURSOS NATURALES

EMULACIÓN DEL DAÑO POR RADIACIÓN DE REACTOR DE  
FUSIÓN NUCLEAR

JESÚS PEDRO DE VICENTE BUENO

FEBRERO DE 2010

TITULACIÓN: INGENIERO DE MINAS

PLAN: 1996

Autorizo la presentación del proyecto

***EMULACIÓN DEL DAÑO POR RADIACIÓN DE REACTOR DE FUSIÓN NUCLEAR***

Realizado por

**Jesús Pedro de Vicente Bueno**

Dirigido por

**Prof. Dr. Félix José Salazar Bloise**

y

**Dr. Rafael Alberto Vila Vázquez**

Laboratorio Nacional de Fusión por Confinamiento Magnético (Ciemat)

Firmado: **Prof. Dr. Félix José Salazar Bloise**

Fecha: .....

*«Hay una fuerza motriz más poderosa  
que el vapor, la electricidad  
y la energía atómica, la voluntad.»*

A. Einstein (1879-1955)

# Índice general

Resumen . . . . .	VIII
Abstract . . . . .	VIII

## DOCUMENTO 1: MEMORIA

1	OBJETIVOS Y ALCANCE . . . . .	2
2	DEFINICIÓN DEL PROBLEMA TRATADO . . . . .	3
2.1	Situación energética actual . . . . .	3
2.2	Fusión nuclear como solución energética . . . . .	4
2.3	Problemas tecnológicos de la fusión . . . . .	7
2.4	Solución a problema de los materiales . . . . .	8
2.5	Donde se sitúa el presente proyecto . . . . .	11
3	ANTECEDENTES . . . . .	13
3.1	Métodos de emulación . . . . .	13
3.2	Tecnología de referencia . . . . .	14
3.3	Normativa y estándares . . . . .	15
3.4	Instalaciones actuales y sus limitaciones . . . . .	18
3.5	Velocidad de emulación . . . . .	20
4	DEFINICIONES . . . . .	23
5	SELECCIÓN DEL MÉTODO . . . . .	29
5.1	Método seleccionado . . . . .	29
5.2	Descripción de la emulación . . . . .	32
6	CÁLCULOS . . . . .	35



6.1	Energía máxima de los iones . . . . .	35
6.2	Mínimo daño material . . . . .	37
6.3	Superficie de irradiación . . . . .	37
6.4	Haz multienergético . . . . .	37
6.5	Parámetros generales . . . . .	38
7	PROPUESTA DE INSTALACIÓN . . . . .	39
7.1	Sistemas principales . . . . .	39
7.2	Sistemas auxiliares y de diagnóstico . . . . .	41
8	DIMENSIONAMIENTO DE LOS EQUIPOS . . . . .	44
8.1	Fuente primaria de partículas . . . . .	44
8.2	Compuesto organometálico . . . . .	46
8.3	Cámara MIVOC . . . . .	48
8.4	Fuente de iones . . . . .	50
8.5	Acelerador . . . . .	52
8.6	Dipolos magnéticos . . . . .	57
8.7	Necesidad de focalización . . . . .	59
8.8	Cuadrupolos magnéticos . . . . .	60
8.9	Degradador . . . . .	63
8.10	Neutralizador . . . . .	63
8.11	Diagnóstico de haz . . . . .	64
8.12	Cámara de vacío . . . . .	67
8.13	Suministros auxiliares . . . . .	67
9	DISEÑO DEGRADADOR DE IONES . . . . .	70
9.1	Conceptos de degradador . . . . .	70
9.2	Concepto seleccionado . . . . .	76
9.3	Láminas del degradador . . . . .	79
10	CONCLUSIONES . . . . .	81
11	BIBLIOGRAFÍA . . . . .	82
11.1	Textos legislativos . . . . .	82

11.2	Normas y patentes . . . . .	82
11.3	Libros . . . . .	83
11.4	Artículos de revistas y publicaciones . . . . .	83
11.5	Documentos electrónicos . . . . .	89
11.6	Bibliografía general . . . . .	89

## **DOCUMENTO 2: ESTUDIO ECONÓMICO**

1	INVERSIÓN INICIAL . . . . .	91
1.1	Costes equipos no comercializados . . . . .	91
1.2	Coste de equipos . . . . .	92
2	COSTES ANUALES . . . . .	93

## **DOCUMENTO 3: ANEXOS**

### **ANEXO A ESTUDIO DE DAÑO MATERIAL POR RADIACIÓN**

A.1	RADIACIÓN EN REACTOR DE FUSIÓN . . . . .	96
A.1.1	Radiación Neutrónica . . . . .	97
A.1.2	Materiales irradiados . . . . .	100
A.2	INTERACCIÓN PARTÍCULA - MATERIA . . . . .	103
A.2.1	Interacción neutrón - átomo . . . . .	104
A.2.2	Interacción ión - átomo . . . . .	111
A.3	DAÑO POR RADIACIÓN EN EL MATERIAL . . . . .	130
A.3.1	Fenomenología . . . . .	130
A.3.2	Modelo teórico . . . . .	134
A.4	DAÑO PRIMARIO EN REACTOR DE FUSIÓN . . . . .	148

### **ANEXO B EMULACIÓN DE DAÑO CON IONES PESADOS**

B.1	MOTIVACIÓN PARA EMULAR . . . . .	155
B.2	ANÁLISIS GENERAL DE DAÑO . . . . .	157

B.2.1	Energía disponible para producir daño . . . . .	157
B.2.2	Distribución espacial del daño . . . . .	160
B.3	DEMOSTRACIÓN TEÓRICA . . . . .	162
B.3.1	Magnitud del daño primario . . . . .	162
B.3.2	Espectros de PKA . . . . .	163
B.3.3	Funciones de daño . . . . .	165
B.4	CÁLCULO DE RADIACIÓN IÓNICA . . . . .	167
B.4.1	Ajuste del flujo de iones . . . . .	167
B.4.2	Ajustes de distribución espacial del daño . . . . .	170
B.5	VENTAJAS DE LA EMULACIÓN IÓNICA . . . . .	171

## **ANEXO C SELECCIÓN DE ACELERADOR**

C.1	ACELERADOR DE IONES PESADOS . . . . .	174
C.1.1	Método de aceleración orbital . . . . .	174
C.1.2	Estabilidad del haz de iones en el ciclotrón . . . . .	185
C.1.3	Problemática del ciclotrón . . . . .	189
C.1.4	Concepto de ciclotrón isócrono . . . . .	193
C.1.5	Extracción del haz de iones del ciclotrón . . . . .	197
C.1.6	Selección de la fuente de iones del ciclotrón . . . . .	199
C.1.7	Selección general de ciclotrón isócrono . . . . .	208
C.2	ACELERADOR DE IONES LIGEROS . . . . .	220

## **ANEXO D CATÁLOGOS**

# Índice de figuras

## DOCUMENTO 1: MEMORIA

2-1	Esquema básico de central eléctrica de fusión nuclear . . . . .	6
2-2	Reacción nuclear de fusión entre deuterio y tritio . . . . .	8
2-3	Fenomenología del <i>daño primario</i> por radiación . . . . .	9
3-1	Esquema general de equipo instalación University of Wisconsin-Madison	14
3-2	Plano de instalación y recreación 3D ciclotrón AVF TIARA . . . . .	19
3-3	Tasas de aumento de generación de daño, hidrógeno y helio . . . . .	22
5-1	Funciones de daño correspondientes a diferentes radiaciones . . . . .	31
7-1	Conexión propuesta para los diferentes sistemas . . . . .	43
8-1	Conexión de la <i>fente primaria</i> con la <i>fente de iones</i> . . . . .	46
8-2	Molécula de ferroceno y aspecto de muestra sólida . . . . .	47
8-3	Fotografía de la fuente de iones <i>Hypernanogan®</i> . . . . .	51
8-4	Representación tridimensional de <i>Cyclone® 70</i> . . . . .	54
8-5	Disposición de bobinas tipo electroimán en <i>ciclotrón</i> . . . . .	55
8-6	Curvatura del haz debida a un <i>dipolo magnético</i> . . . . .	58
8-7	Focalización de haz de iones en <i>cuadrupolo magnético</i> . . . . .	60
8-8	Disposición alternada de <i>cuadrupolos magnéticos</i> . . . . .	61
8-9	Vistas tridimensionales de la <i>Faraday cup</i> . . . . .	66
8-10	Vistas tridimensionales del <i>medidor de emitancia</i> . . . . .	66
9-1	Concepto de <i>degradador</i> tipo cuña simple . . . . .	71
9-2	Concepto de <i>degradador</i> tipo cuña doble . . . . .	72
9-3	Concepto de <i>degradador</i> tipo cuña rotativa . . . . .	73

9-4	Concepto de <i>degradador</i> tipo rotativo . . . . .	74
9-5	Concepto de <i>degradador</i> tipo de reflexión . . . . .	75
9-6	Concepto de <i>degradador</i> tipo turbulento . . . . .	76
9-7	Concepto definitivo de <i>degradador</i> . . . . .	77
9-8	Elementos anexos a <i>degradador</i> y conexión . . . . .	78
9-9	Porcentaje de iones transmitidos por <i>degradador</i> . . . . .	80

# Índice de tablas

## DOCUMENTO 1: MEMORIA

3-1	Relación de la normativa asociada a los entornos de riesgo . . . . .	16
3-2	Relación a nivel mundial de instalaciones de emulación neutrónica . . . .	19
3-3	Tasas de aumento de generación de daño, hidrógeno y helio . . . . .	20
5-1	Relación de problemas y soluciones de las alternativas . . . . .	31
6-1	Rangos de penetración de daño en las diferentes instalaciones actuales .	36
6-2	Datos de partida del proyecto . . . . .	38
7-1	Propuesta de sistemas y equipos en el esquema conceptual . . . . .	42
8-1	Principales especificaciones de la fuente de iones <i>Hypernanogan</i> ® . . . .	51
8-2	Principales especificaciones del <i>dipolo magnético 3474-140</i> . . . . .	59
8-3	Principales especificaciones del <i>cuadrupolo magnético EMQD-02-100-600</i> .	62
8-4	Principales consumos eléctricos de los equipos de la instalación . . . . .	68

## DOCUMENTO 2: ESTUDIO ECONÓMICO

1-1	Costes de fabricación del <i>ciclotrón</i> . . . . .	92
1-2	Precios de las láminas de espesores usados en el <i>degradador</i> . . . . .	92
1-3	Inversión inicial estimada para la instalación . . . . .	92

## RESUMEN

La fusión nuclear, candidata a futura fuente masiva de energía, genera condiciones de radiación neutrónica tan extremas que degradarían las propiedades de los materiales de un reactor, produciendo fallo en servicio. En la actualidad no existen instalaciones que reproduzcan estas condiciones, y permitan entonces el desarrollo de los materiales de fusión. Este proyecto propone el desarrollo de una instalación que sí las emule. En primer lugar se procedió a justificar la validez de la correlación entre emulación y realidad, para después proceder al dimensionamiento de los equipos principales, así como a su evaluación de costes. La instalación propuesta permite la emulación del daño neutrónico a ritmo 6400 veces superior al real, pudiendo acelerar iones de hierro a energías de 400 MeV, e irradiar simultáneamente áreas de 2,25 cm<sup>2</sup>. Este proyecto precede a la fase de ingeniería de detalle de una instalación donde pudieran desarrollarse, y certificarse, los futuros materiales de los reactores de fusión nuclear de primera generación.

**palabras clave:** fusión nuclear, daño por radiación neutrónica, primera pared, emulación de daño, iones pesados, ciclotrón.

## ABSTRACT

Nuclear fusion, as a candidate for a energy source in the future, creates an extreme neutron radiation environment that would degrade the properties of the reactor materials, resulting in failure of the service. Currently there are no facilities that reproduce the necessary conditions for the development of new fusion materials. The present project proposes the construction of a facility to emulate the neutron radiation damage. Firstly, the validation of the correlation between emulation and real conditions was demonstrated, followed by the sizing of the main equipments, and the evaluation of their costs. The proposed facility allows the reproduction of neutron damage 6400 times faster than real neutron conditions. It accelerates iron ions to 400 MeV and it irradiates 2,25 cm<sup>2</sup>. This project allows the development of the detail engineering stage of a facility that could develop and certify the nuclear fusion materials of the first generation power plants.

**keywords:** nuclear fusion, neutron radiation damage, first wall, damage emulation, heavy ions, cyclotron.

*EMULACIÓN DEL DAÑO POR RADIACIÓN DE REACTOR DE  
FUSIÓN NUCLEAR*

DOCUMENTO 1: **MEMORIA**



# 1 OBJETIVOS Y ALCANCE

El objetivo del presente proyecto es la propuesta conceptual de una instalación viable para la emulación del daño neutrónico, producido en los materiales internos de un reactor de fusión nuclear de primera generación.

Esta instalación debe diferenciarse de otras ya existentes a nivel internacional en cuanto a capacidad de daño producido. De forma tal, que resulte atractiva para el ensayo de los nuevos materiales de los futuros reactores de fusión. Conseguir ésto requiere alcanzar espesores de penetración de daño de pocas decenas de micrómetros y áreas de irradiación superiores a  $1 \text{ cm}^2$ .

El alcance del proyecto queda limitado por varios puntos, a saber, a) la selección conceptual del método de emulación adecuado, analizando publicaciones realizadas por otros autores, b) la justificación teórica del método seleccionado, utilizando para ello la comparación de «daños primarios», reales y simulados, los cuales serán los responsables de los posteriores «efectos de la radiación», c) el dimensionamiento general de los elementos más relevantes, y d) la estimación «grosera» de las inversiones necesarias. La no existencia a nivel internacional de instalaciones con capacidades similares a la propuesta, permitirá el libre ajuste del precio de los servicios prestados, a fin de obtener el beneficio esperado, asegurándose entonces la viabilidad económica a los inversores.

Fuera del alcance del presente proyecto, y paralelamente al mismo, se proponen ampliaciones para la emulación del daño también producido por intensos campos magnéticos, por radiaciones ionizantes, y por la difusión y acumulación de átomos de hidrógeno y de helio, todos ellos simultáneamente sobre los mismos materiales tratados.

Como continuación al presente proyecto, se propone el dimensionamiento detallado y la estimación de costes precisa, de cada uno de los elementos que componen la instalación.

## 2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA TRATADO

El objetivo de este capítulo será identificar, dentro de un contexto global, el problema que el presente proyecto intenta resolver. Por tanto, se pretende comenzar con una breve exposición de los problemas generales de la situación energética actual, a nivel internacional, para de esta forma motivar el uso de la energía de fusión nuclear como posible alternativa energética, pues se expone como una solución a estos problemas. Posteriormente, se hace revista a los principales problemas de la tecnología de fusión, uno de los cuales, pretende ser abordado en el presente proyecto.

### 2.1 SITUACIÓN ENERGÉTICA ACTUAL

El borrador *CP.15* del reciente *tratado climático de Copenhagen* [110], actualmente no vinculante para las partes, establece el ritmo de cambio del clima como uno de los cambios actuales más importantes a nivel internacional. Según este borrador, el objetivo del citado tratado será disminuir la influencia «antropogénica» sobre este cambio. También se expone que esta influencia es debida a la emisión de *gases de efecto invernadero*, los cuales el futuro tratado intentará disminuir. El acuerdo final entre las partes, debiera entonces ratificar esta directriz. Según el *key world energy statistics 2009* [111], de la *International Energy Agency*, el 99,6 % de las emisiones de dióxido de carbono en 2007, principal *gas de efecto invernadero*, fueron debidas a la combustión de petróleo, de gas natural y de carbón.

Por otro lado, según el *statistical review of world energy 2009* [112], de *The British Petroleum Company*, la relación entre capacidad de reservas mundiales y capacidad de producción anual de petróleo, de gas natural y de carbón, para 2008 se estimó en 42, 60 y 122 años, respectivamente. Suponer constante el ritmo de producción actual en el futuro, sería uno de los mejores escenarios que pudiera tener el *mix energético* actual (aunque difícilmente pueda mantenerse, pues es creciente la demanda energética de los países con «economía emergente», y ésta no podrá compensarse con la eficiencia energética lograda por los

países con «economía desarrollada»). En cualquier caso, el abastecimiento energético de los combustibles fósiles puede considerarse como limitado.

En 2008, el 59,9 % de las reservas mundiales de petróleo, el 60,0 % de las de gas natural y el 4,0 % de las de carbón estaban concentradas en la zona geográfica conocida como *oriente medio* [112]. Elevado es el porcentaje de los países de esta zona que pueden considerarse como de «inestabilidad política», no garantizándose entonces el suministro a futuro, ni a las «economías desarrolladas» ni a las «emergentes». Consecuencia actual de esta distribución «caprichosa» es la volatilidad de precios, que aunque el demandante pueda protegerse especulativamente con *contratos de futuro*, energéticamente sigue siendo una deficiencia estratégica.

El sector eléctrico, que es el que nos ocupa, está ampliamente influenciado por lo anteriormente expuesto, pues el 68,0 % de su generación en 2007, fue debida a la combustión del combustibles fósiles [111]. Se hace necesaria entonces, una modificación del *mix eléctrico* a largo plazo.

## 2.2 FUSIÓN NUCLEAR COMO SOLUCIÓN ENERGÉTICA

Se busca posible candidata a *fuentes masiva de energía*, capaz de formar parte del *mix eléctrico* de fines del siglo XXI. Una alternativa podría ser la energía térmica por fusión nuclear. Dentro de las diferentes reacciones de fusión, la opción más viable sería la del deuterio y tritio mediante confinamiento magnético, tal y como se indica en el capítulo A.1 (pág. 96) del ANEXO A. Este tipo de energía corrige los defectos de los combustibles fósiles, planteados en el apartado 2.1 (pág. 3) de este capítulo.

La fusión no emite *gases de efecto invernadero*, como se demuestra con la ecuación A-1 del ANEXO A (pág. 95). En esta ecuación se observa que el residuo (o subproducto, según se considere) es el isótopo-4 del helio. Este elemento puede comercializarse<sup>1</sup>, o puede

---

<sup>1</sup>Aplicaciones del helio podrían ser varias, a saber, uso como gas de relleno en elementos flotantes, inmersión acuática, refrigerante, soldadura por arco, túneles de viento, etc.

expulsarse al exterior, pues al ser su forma molecular ( $He_2$ ) menos densa que la de los gases atmosféricos y no ser reactiva (es un *gas noble*), escapa a las últimas capas de la atmósfera o incluso al espacio exterior, no constituyendo un *gas de efecto invernadero*.

Esta fuente de energía garantiza la disponibilidad de combustible de fusión durante toda escala temporal humana [23], pues sus dos elementos necesarios, el deuterio y el litio, se encuentran en gran abundancia. El deuterio se encuentra en el agua del mar en cantidades aproximadas de 150 ppm en peso. La abundancia del litio es de 65 ppm en peso en la corteza terrestre, siendo sus principales menas los minerales lepidolita, petalita, espodumena y amblygonita.

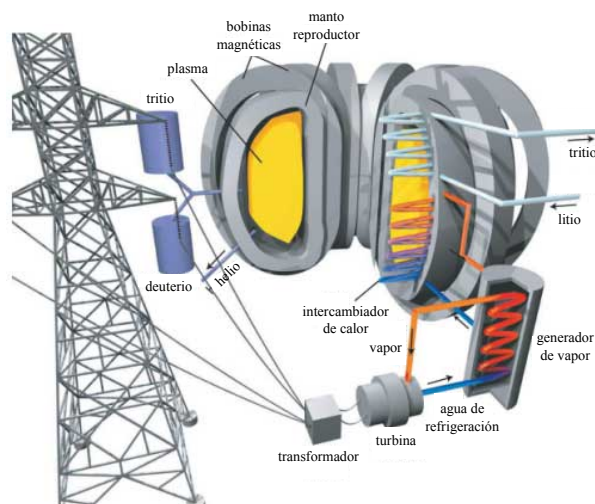
La distribución geográfica del combustible puede considerarse entonces homogénea a lo largo de la superficie de nuestro planeta. Se evitaría así la incertidumbre en el suministro, así como también la volatilidad en los precios.

Adicionalmente, la fusión nuclear por confinamiento magnético es implícitamente segura en caso de incidente. El combustible es inyectado de forma continua en el reactor, a diferencia de las recargas discretas de los reactores de fisión, por lo que se evita la acumulación de grandes cantidades de energía potencial, ya que de lo contrario existiría el riesgo de ser liberada de forma repentina. Por otro lado, esta tecnología no hace uso de reacciones en cadena, y además sus parámetros de operación son muy precisos, por lo que cualquier transitorio inesperado disminuiría radicalmente la probabilidad de reacción nuclear, apagándose el reactor, no habiendo riesgo de explosión.

Desde el punto de vista de la eficiencia energética, la relación entre energía generada y masa de los reactivos en una reacción nuclear, es del orden del millón de veces superior que en una reacción química (reacción característica en la combustión fósil). Como ejemplo, se obtiene la misma cantidad de energía en un gramo de combustible de fusión que en una tonelada de carbón [23]. No obstante, esta afirmación puede llevar a confusión, pues una tasa eficiente de reacciones de fusión requiere de la aplicación externa de energía, principalmente para calentar el plasma a la temperatura en la que se produzca la liberación eficiente de sus electrones orbitales. Para la fusión del deuterio y del tritio, esta

temperatura se sitúa aproximadamente en 100 000 000 K (diez veces superior a la temperatura del núcleo del sol). El proyecto *ITER*, intentará demostrar que este aporte externo de energía puede ser inferior al obtenido por las reacciones de fusión.

La argumentación expuesta previamente permite establecer la fusión nuclear como posible fuente energética del futuro. La figura 2-1 muestra el esquema básico de una central eléctrica de fusión nuclear de primera generación, *DEMO*, muy similar al de cualquier otra central térmica. En ella se puede apreciar como un plasma alimentado por deuterio y tritio es confinado por la acción de unas bobinas magnéticas. Los neutrones y las partículas energéticas de helio, procedentes de la reacción de fusión, interaccionan con el intercambiador de calor, cediendo su energía y generando el vapor, que se dirige a la turbina para transformar su energía en energía mecánica. Aunque estas centrales disponen de un almacenamiento primario de tritio, necesario para arrancar el reactor, éste es generado continuamente mediante la reacción nuclear de los neutrones con el litio del *manto reproductor*, el cual es inyectado externamente. Finalmente el helio es dirigido hacia el fondo del reactor, donde es recogido por el *divertor*, y se extrae como residuo.



*Figura propiedad de Fusion for Energy*

**Figura 2-1:** Esquema básico de central eléctrica de fusión nuclear

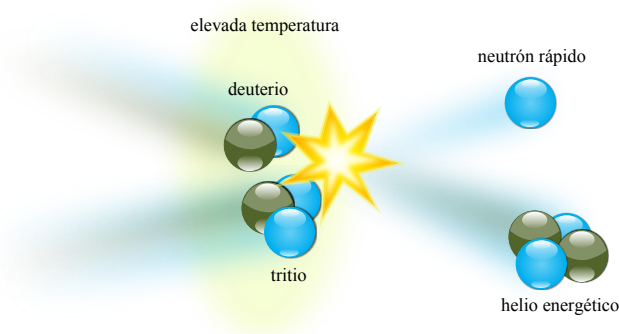
## 2.3 PROBLEMAS TECNOLÓGICOS DE LA FUSIÓN

Sin embargo, aunque la fusión pueda presentarse como solución a los problemas energéticos actuales, su desarrollo cuenta con ciertos problemas tecnológicos, que limitan la construcción del primer reactor comercial. Podemos asociar estos problemas en dos grandes grupos. En el primero estarían los relativos a la operación del reactor, y en el segundo los relativos a la durabilidad de la planta.

En el primero de los grupos, el principal problema es debido a la elevada temperatura que necesita alcanzar el combustible. A esta temperatura, el combustible se encuentra en estado de plasma, por lo que su fuerte gradiente térmico con los materiales reactor, obliga a que se evite su contacto material con ninguno de ellos. Conseguir esto requiere del confinamiento del plasma mediante el uso de precisos campos magnéticos, teniendo en cuenta que el plasma puede considerarse como un fluido turbulento. Por lo que a la dificultad tecnológica del control preciso de todo fluido turbulento, deben añadirse las interacciones electromagnéticas entre sus partículas. Otros problemas a resolver dentro de este grupo, podrían ser los asociados al desarrollo de nuevas tecnologías, como por ejemplo potentes sistemas de calentamiento, manipulación remota, sistemas de diagnóstico, etc.

En cuanto al grupo de los problemas relativos a la durabilidad de la planta, el principal de ellos es el referente a la modificación de las propiedades de los materiales durante operación, pues si sobrepasaran ciertos límites producirían fallo en servicio. Los materiales de un reactor de fusión están sometidos a las condiciones más extremas de radiación neutrónica, de gradientes de temperatura, y de campos magnéticos, que puedan existir en cualquier instalación tecnológica actual. Su estudio es llevado a cabo en el ANEXO A (pág. 95) , sin embargo en la figura 2-2 puede apreciarse que el origen de la radiación neutrónica está en la propia reacción nuclear, pues la fusión del deuterio y del tritio tiene como productos un neutrón, muy energético de 14,1 MeV, y un ión de helio muy energético también, de 3,5 MeV.

Sin embargo, aunque se trate de una tecnología altamente compleja, y con ciertos problemas tecnológicos, los actuales proyectos internacionales incentivan la participación de



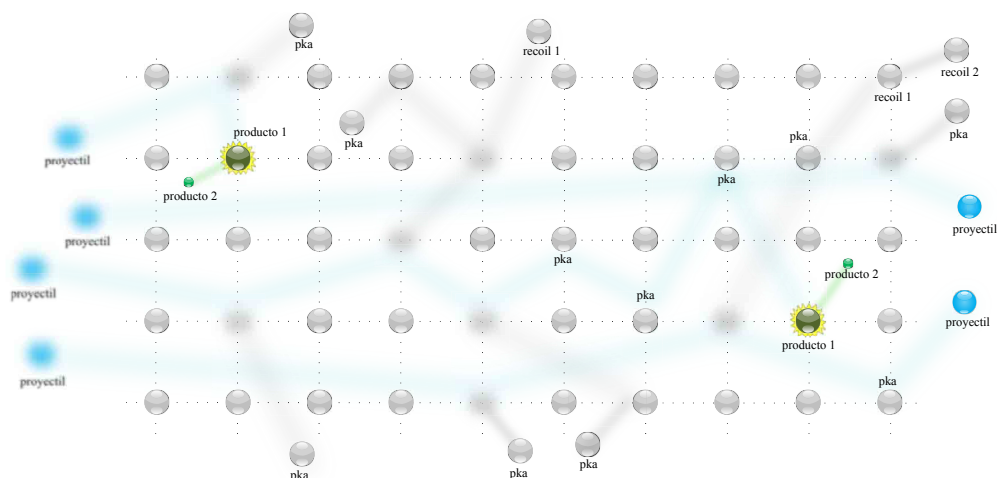
**Figura 2-2:** Reacción nuclear de fusión entre deuterio y tritio

todos sus miembros en el desarrollo de cada una de sus fases. Y aunque esta forma de gestión no sea eficiente, favorece la universalidad de la tecnología de fusión, facilitando su futura libre explotación por todos los países.

## 2.4 SOLUCIÓN A PROBLEMA DE LOS MATERIALES

La modificación de las propiedades de los materiales es debida fundamentalmente al *daño primario* provocado por la radiación neutrónica. En la figura 2-3 se puede apreciar como los proyectiles, que en este caso serían los neutrones, transmiten su energía a los átomos de la red del material, desplazándolos de sus posiciones de equilibrio. Y estos átomos a su vez desplazarían a otros átomos. El resultado final es una cascada de desplazamiento por cada uno de los neutrones incidentes, que modificará la red del material, modificando por ende sus propiedades macroscópicas.

Las principales propiedades materiales modificadas durante irradiación pueden ser muy diversas (consúltese la tabla A.3-1 para más información). Soluciones para evitar estas modificaciones no pasan por la reducción, o en su caso supresión, de las condiciones extremas de radiación a las que son sometidos los materiales dentro del reactor, pues son inherentes a la propia tecnología. Las soluciones a este problema pasarían por el desarrollo de nuevos materiales, tales que sus propiedades fueran poco sensibles a los hostiles entornos de radiación. Se trataría entonces de soluciones correctivas, y no preventivas.



**Figura 2-3:** Fenomenología del *daño primario* por radiación

En primera aproximación, las actuales líneas de investigación [58] apuntan al desarrollo de cuatros materiales, como candidatos a formar parte de la *primera pared* de los reactores comerciales de primera generación, a saber, a) aceros ferrítico-martensíticos de baja activación (RAFM), b) aceros RAFM reforzados con dispersiones de óxidos (OSD RAFM), c) materiales cerámicos compuestos de matriz de SiC y d) aleaciones de wolframio, apartado A.1.2 (pág. 100) . Todos tienen en común, una elevada resistencia a la modificación de sus propiedades en entornos de elevada radiación. Y será en ellos, donde se centre el desarrollo de futuras investigaciones.

No obstante, en el caso de aquellos sistemas electrónicos que pudieran ser expuestos a elevada irradiación, como son los de instrumentación, control o diagnóstico, así como otros dispositivos afines, la solución debiera tender hacia un carácter más preventivo, pues las propiedades de interés de sus materiales ya no son tanto mecánicas sino electromagnéticas (mucho más sensibles a la radiación). En tal caso, la solución podría tender hacia la búsqueda de sistemas de protección y de aislamiento, tipo escudo. Pero la solución preventiva de este caso, queda fuera del alcance del presente proyecto, facilitándose solamente la posible solución correctiva, es decir, el desarrollo de materiales más resistentes, en cuanto a la propiedad de interés se trate.



El desarrollo de estos nuevos materiales requiere de la reproducción de las condiciones reales existentes en el reactor. Esto puede ser llevado a cabo por dos vías, a) la de la simulación computacional, y b) la de la experimentación.

En el ANEXO A (pág. 95) , se analiza la viabilidad de la vía de la simulación. Llegando a la conclusión de que la elevada potencia de cálculo, requerida para simular con fiabilidad la conexión entre los *efectos de la radiación* y la modificación de las propiedades macroscópicas de los materiales, la hace inviable, excepto en algunos casos específicos. No será entonces hasta que se produzca el desarrollo de técnicas de computación más potentes que las actuales, como por ejemplo la *computación cuántica*, cuando esta vía pueda constituirse como fundamental para el desarrollo de materiales bajo condiciones de fuerte radiación. No obstante, el uso de *supercomputadores*, en ocasiones permite la conexión entre los *efectos de la radiación* y la modificación de las propiedades macroscópicas, pero siempre limitado a volúmenes muy reducidos de estudio y a condiciones con grado de hostilidad muy reducido. Descartaremos entonces esta vía en el desarrollo del presente proyecto.

La vía de la experimentación, requiere por otro lado, la reproducción física de las condiciones del reactor, por lo que puede llegar a ser en ocasiones, una vía de elevado coste económico. Dentro de sus posibles opciones, la experimentación dentro del propio reactor resultaría ser evidentemente la mejor de ellas, desde el punto de vista técnico, pero no desde el punto de vista de la lógica, pues debe recordarse que la solución del problema está en el desarrollo de los materiales del propio reactor, por lo que esta opción resultaría ilógica.

No obstante, pueden reproducirse con suficiente exactitud las condiciones físicas del reactor por otros métodos, como por ejemplo mediante el bombardeo de un haz de deuterones sobre un blanco de litio. De esta forma se producen reacciones nucleares de fusión, similares a las producidas en los reactores, en las que se generan neutrones de alta energía. Pero existe diferencia entre el espectro neutrónico de este método y el característico de un reactor de fusión, siendo el primero de ellos mucho más energético, por lo que podría acelerarse entonces la tasa de producción del daño. En la actualidad existe un proyecto en

desarrollo de una instalación de este tipo, conocida como *IFMIF* [24]. Tomaremos entonces la experimentación como la vía adecuada para el desarrollo de los materiales de fusión.

## 2.5 DONDE SE SITÚA EL PRESENTE PROYECTO

Podría suponerse que los reactores nucleares de fisión, pudieran constituir un escenario para la experimentación comentada en el apartado anterior, pues en ellos existe una intensa radiación neutrónica. Pero aunque este flujo de neutrones es incluso superior al de un reactor de fusión, es mucho menos energético [55], por lo que no se conseguiría la adecuada reproducción de daño.

En adelante, consideraremos que las únicas condiciones hostiles del reactor de fusión, son las debidas radiación neutrónica, y por tanto, ésta será la única que consideraremos para el desarrollo del presente proyecto. Ignoraremos por tanto, las condiciones de alto campo magnético y las de radiación ionizante (producidas por el confinamiento magnético y por la partículas que se escapan del plasma), que se trasladarían a estudios fuera de los límites del alcance del presente proyecto, tal y como se anticipó en el capítulo 1 (pág. 2).

El desarrollo de la instalación *IFMIF*, comentado en el apartado 2.4 (pág. 8), es prácticamente paralelo al del reactor experimental *ITER*, tanto en plazos de construcción como de operación. Comenzando la operación de ambos, no antes del año 2017 [24]. Entonces, tanto *IFMIF* como *ITER*, pueden considerarse fases previas al desarrollo del primer prototipo de central eléctrica de fusión nuclear, *DEMO*, dentro del programa internacional de desarrollo de la energía de fusión como fuente energética.

Por otro lado, el coste total del desarrollo del proyecto *IFMIF*, resulta ser excesivamente elevado, pues se estima en 910 MUSD [25].

Por tanto, aunque la reproducción del daño material con este proyecto sea técnicamente la mejor de las opciones [26], se presenta interesante la proposición de una opción alternativa, que aunque no permita la reproducción exacta, si permita una emulación del daño de la radiación neutrónica, pero cuya aplicación en un proyecto no requiriera de largos periodos de construcción, ni de costes tan elevados como los de *IFMIF*. Es entonces en la

emulación del daño neutrónico, y no en la reproducción del daño real, donde se sitúa el presente proyecto.

Como conclusión al presente capítulo, el autor quisiera hacer nuevamente énfasis de la elevada importancia que tiene el uso de los materiales adecuados en un reactor nuclear. Pues como se ha comentado anteriormente, están sometidos a las condiciones más hostiles a las que se haya sometido un material en un reactor actual de cualquier tipo, pudiendo en algunos parámetros ser similares a las del sol. Motivo por el cual, en la actualidad no existen materiales que puedan mantener las especificaciones que el sistema al que pertenezcan les solicite. Produciéndose en cualquier caso fallo, que dependiendo de la importancia del sistema podría poner en peligro tanto la operatividad de la central eléctrica, así como también su seguridad. Evidentemente se deduce el beneficio económico que tiene asociado la correcta selección de materiales.

### 3 ANTECEDENTES

La opción alternativa de emulación del daño neutrónico, anticipada en el apartado 2.5 (pág. 11) , consiste en el uso de partículas alternativas a los neutrones. En el campo de estudio de los materiales para fusión, esta alternativa puede dividirse en dos, a saber, a) el uso de protones de alta energía [27], y b) el uso de iones pesados de alta energía [28]. En el capítulo 5 (pág. 29) , se procede a realizar la selección entre ambas alternativas, pero para facilitar el desarrollo de este capítulo, y así poder establecer los condicionantes del presente proyecto, se hace necesario anticipar que la opción b) será la seleccionada.

#### 3.1 MÉTODOS DE EMULACIÓN

Las alternativas experimentales existentes para la emulación del daño neutrónico consisten en el empleo de otro tipo de radiaciones. De esta forma los desplazamientos, que provocan los neutrones al interactuar con los átomos del material, son provocados por otro tipo de partículas. Estas partículas pueden ser protones o iones pesados.

En el ANEXO B (pág. 154) se demuestra la validez teórica de la emulación con iones pesados, pero su desarrollo puede extrapolarse a los iones ligeros, y en consecuencia también a los protones (iones del hidrógeno). Avalan este desarrollo los estudios de C. Abromeit [39] y de D. J. Marzey [40]. Por lo que la validez de las alternativas queda demostrada teóricamente.

Por otro lado, los trabajos de G. S. Was [38] demuestran la validez experimental de la emulación con protones. Y los de H. Vernon [41] para el caso de los iones pesados.

Una vez planteadas las alternativas para la emulación del daño neutrónico, se propone la selección de la alternativa que mejor se adapte a las necesidades del proyecto.

### 3.2 TECNOLOGÍA DE REFERENCIA

Una vez seleccionado el tipo de partículas con que emular el daño, debe proponerse un esquema general, que defina los principales equipos con que debiera contar una instalación que proceda a la emulación de dicho daño. Por ello, en el presente apartado, se hace revista del esquema básico general utilizado por otras instalaciones similares, y ya será en el capítulo 7 (pág. 39) , donde se ajusté este esquema a nuestros requisitos particulares.

En la figura 3-1, puede apreciarse el esquema básico general de equipos, utilizado por la antigua instalación de la University of Wisconsin-Madison [29]. La finalidad que motivó el desarrollo de esta instalación, fue el estudio de la emulación de daño neutrónico en materiales, mediante el uso de iones pesados. Motivo por el cual, este esquema constituye un buen punto de partida teórico para la propuesta del esquema de nuestra instalación.

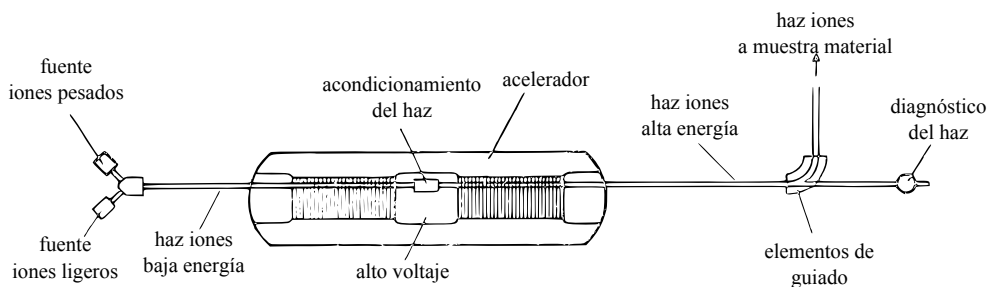


Figura tomada de H. Vernon Smith [29]

**Figura 3-1:** Esquema general de equipo instalación University of Wisconsin-Madison

En esta figura pueden identificarse siete sistemas principales, a saber, a) de inyección del haz de iones, formado por las fuentes de iones, tanto pesados como ligeros, que serán el origen de las partículas con las que producir el daño, b) de aceleración del haz, cuyo principal elemento es el acelerador lineal, encargado de aumentar la energía cinética de las partículas, c) de acondicionamiento del haz, encargado de ajustar ciertos parámetros del haz de partículas, como por ejemplo la emitancia y la carga eléctrica de sus partículas, d) de guiado y focalización del haz, necesarios para que el haz de partículas incida sobre la zona deseada, e) de diagnóstico del haz, para controlar el estado de los parámetros, f) de irradiación de muestras, compuesto por los equipos que albergan las muestras irradiadas

y que permiten la realización de ensayos de propiedades, y g) de equipos auxiliares, que aunque no aparezca en la figura, se considera imprescindible como por ejemplo para el suministro eléctrico, vacío y refrigeración.

### 3.3 NORMATIVA Y ESTÁNDARES

En este apartado, se expone la normativa, que a juicio del autor, es de obligatorio cumplimiento para la segura operación de la instalación propuesta, y que por tanto condiciona el desarrollo del presente proyecto. No citaremos normativa alguna referente a los equipos individuales, pues se supone que los suministradores han obtenido los certificados correspondientes en materia de seguridad. Tampoco se hará referencia a normativa en cuanto a montaje y «puesta a punto» de estos equipos, pues no tiene cabida en el alcance del presente proyecto. Por otro lado, se exponen algunas normas, que aún no siendo de obligatorio cumplimiento, sus recomendaciones permiten adoptar métodos estandarizados, como prueba de «buenas prácticas».

#### 3.3.1 DE OBLIGATORIO CUMPLIMIENTO

Si la propuesta de instalación de este proyecto llegara a materializarse, constituiría una de las pocas instalaciones de iones pesados de nuestro país, así como la única diseñada para emular el daño neutrónico, por lo que haría uso haces de iones intensamente energéticos, distanciándose cuantitativamente de las ya existentes, en cuanto a condiciones hostiles se tratara. Motivo por el cual, no existe normativa alguna a la que podamos ceñirnos para su propuesta de diseño.

Como ya se ha comentado, tampoco citaremos normativa alguna referente al diseño de ningún equipo individual, pues se supone que su adquisición sería «llave en mano», y así como también se supone la validez de su homologación y certificado. Y aunque esto no sería aplicable al elemento denominado como *degradador* (capítulo 9 (pág. 70) ), ya que no existe comercialmente, su simple diseño no requeriría de ninguna certificación especial.

Sin embargo, sí es necesaria la adaptación general de la instalación a la normativa vigente, en aras de conseguir las adecuadas condiciones de seguridad para su personal. Estas condiciones de seguridad deben proporcionar protección frente a diversos entornos hostiles existentes en la instalación, a saber, a) entorno de riesgo radiactivo, b) entorno de riesgo eléctrico, c) entorno de riesgo magnético, d) entorno de riesgo de alta temperatura y e) entorno de riesgo de alta presión de vacío, algunos presentes en mayor intensidad que otros.

La protección del trabajador frente a estos entornos requiere del cumplimiento de la Ley 31/1995 sobre *Prevención de Riesgos Laborales* [1]. No obstante, la tabla 3-1 expone una relación de la diferente normativa particular asociada a cada uno de los entornos de riesgo, y que su cumplimiento aseguraría las condiciones de seguridad requeridas.

**Tabla 3-1:** Relación de la normativa asociada a los entornos de riesgo

Entorno de riesgo	Normativa a aplicar
Radiación	R. D. 783/2001 [2]
Eléctrico	R. D. 614/2001 [3]
Magnético	R. D. 1066/2001 [4]
Temperatura	R. D. 1215/1997 [5]
Presión	R. D. 2060/2008 [6]

*Datos tomados de legislación española y del Boletín Oficial del Estado*

La capacidad que tiene el entorno radiactivo, generalmente de trasladar su influencia más allá de los límites de acción de otros entornos, le convierte en un caso particular. Esto hace, que no solamente sea necesaria que la instalación se ajuste a la normativa correspondiente en materia de protección radiactiva, sino que además sea necesario su licenciamiento e inspección, por parte de un organismo gubernamental competente, el *Consejo de Seguridad Nuclear* en el caso de España.

Entonces en aras del Real Decreto 1836/1999 [7], que fue modificado por el Real Decreto 35/2008 [8], para nuestra instalación debiera realizarse el correspondiente estudio radiactivo, para comprobar si a efectos del citado reglamento, pudiera quedarse exenta de considerarse como *instalación radiactiva*. En caso que si fuera considerada como tal, debiera requerir de una autorización de funcionamiento y de una declaración de clausura,

pues se trata de una *instalación radiactiva con fines científicos*. Así como también requeriría de inspecciones periódicas, y de licencias y acreditaciones para su personal.

### 3.3.2 RECOMENDACIONES DE «BUENAS PRÁCTICAS»

La no existencia de instalaciones para emulación de daño neutrónico en nuestro país, no ha permitido el desarrollo de legislación alguna que regule su diseño. No obstante, se recomienda el seguimiento de parte de la norma ASTM E 521 96 [10]. Esta norma ratifica el objeto de nuestro proyecto, que es el de la investigación de los *efectos de la radiación neutrónica* sobre las propiedades de los materiales para fusión mediante la emulación con radiación iónica. Pero lamentable, la diversidad de alternativas de diseño, no ha permitido que la norma se decante por la selección de ninguna de ellas, solamente especificando la necesidad de un acelerador de iones, y centrando su atención en los métodos de cálculo para la evaluación de daño producido en muestras ya irradiadas, metodología adoptada para justificar la validez de nuestra demostración de validez teórica en el ANEXO B (pág. 154) . Se puede citar que esta norma también hace referencia a la preparación de muestras, previa irradiación, como también al posterior análisis de ellas una vez irradiadas; pero el alcance del presente proyecto no comprende la definición de los experimentos que puedan ser llevados a cabo en la instalación que propone. Finalmente, comentar que los valores de la *energía de desplazamiento*, de los elementos atómicos de interés de nuestra instalación, y que se utilizan en las simulaciones computacionales realizadas en el ANEXO B (pág. 154) , son los recogidos por la citada norma.

También seguiremos la recomendación establecida por la norma ASTM E 821 96 [11] en materia de diagnóstico del haz de iones, que recomienda el uso de elementos conocidos como *Faraday cup* para la medida de la intensidad del haz, así como en materia de homogeneización del área de irradiación, que recomienda la traslación del punto de irradiación para conseguir mayor homogeneización. Comentar que para proyectos más allá del alcance del presente, esta norma establece también recomendaciones sobre aparatos para la realización de ensayos mecánicos de muestras ya irradiadas.



### 3.4 INSTALACIONES ACTUALES Y SUS LIMITACIONES

Hagamos revista de las principales instalaciones a nivel internacional que tienen por objeto, al igual que la nuestra, la emulación del daño neutrónico en los materiales. De esta forma, podremos identificar similitudes y diferencias entre los objetivos de ellas y los de la nuestra, que nos ayudarán en la definición de nuestras capacidades.

En la tabla 3-2 quedan recogidas estas instalaciones. Algunas de ellas cuentan con varios aceleradores, con capacidad para realizar múltiples irradiaciones simultáneas, pero solamente se citará aquel que sea más potente, pues será el que en mayor medida acelere a los iones, y por tanto será al que intentemos superar para dar exclusividad a nuestra instalación. La metodología para identificar la capacidad de aceleración de cada acelerador, consistirá en obtener de la bibliografía existente datos sobre las energías máximas alcanzadas por ellos, así como los estados de carga conseguidos. Estos datos permitirán obtener los factores de operación y de diseño,  $K_o$  y  $K_d$  respectivamente, de los aceleradores (ecuaciones C-31 y C-33), que son proporcionales a la energía con que se pueden acelerar dichos iones. Sin embargo, aunque  $K_d$  sea característico de los *ciclotrones*, se adoptará también de forma virtual para el resto de los aceleradores, a fin poder realizar comparaciones. La determinación de este factor obedece a la relación dada por la ecuación 1, cuyo desarrollo puede consultarse en el ANEXO C (pág. 173) .

$$K_d = (E \cdot A) / Z^2 \quad (1)$$

donde,

$K_d$ , es el factor de diseño equivalente del acelerador, en megaelectronvoltios.

$E$ , es la energía a la que es acelerada la partícula, en megaelectronvoltios.

$A$ , es el número de nucleones que posee el núcleo de la partícula, sin dimensiones.

$Z$ , es número cargas eléctricas elementales de partícula acelerada, sin dimensiones.

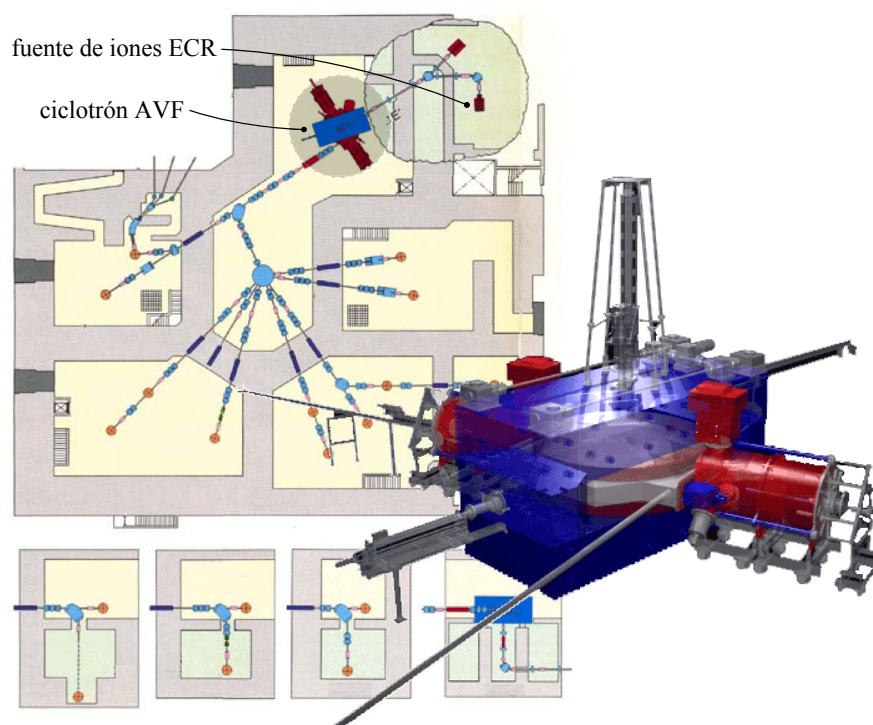
De la tabla 3-2 inferimos que la instalación que cuenta con mayor factor de diseño,  $K_d$ , es *TIARA*, quedando el resto limitadas a una pequeña producción de daño. Por tanto, establecemos los parámetros de la instalación *TIARA* como referencia para ser superados

**Tabla 3-2:** Relación a nivel mundial de instalaciones de emulación neutrónica

Lab.	País	Acelerador principal	Elem.	Energía, en megaelectronvoltios	Estado de carga, Z	Ref.	$K_d^{ef}$ , en megaelectronvoltios
MSD	IND	1,7 MV Tandetron	-	-	-	-	-
HIT	JAP	3,75 MV Van der Graaff	-	-	-	-	-
DNE	JAP	2,0 MV Van de Graaff	Cu	$120 \cdot 10^{-3}$	+1	[31]	8
FSU	ALE	3,0 MV Tandetron	Xe	390	-	[32]	-
IAE	JAP	1,7 MV Tandetron	Fe	6,8	+3	[33]	42
TIARA	JAP	K 110 AVF Ciclotrón	Ar	460	+13	[34]	109
SACLAY	JAP	3,0 MV Pelletron	Fe	20	+11	[35]	9
CARET	JAP	1,3 MV HVTEM	H	$70 \cdot 10^{-3}$	+1	[36]	0,1

*Selección y adaptación de datos de Yves Serruys [30]*

por la instalación propuesta por el presente proyecto. En la figura 3-2 puede apreciarse una recreación artística del *ciclotrón AVF* de la instalación *TIARA*.



*Plano y recreación 3D propiedad de JAEA (Japan Atomic Energy Agency)*

**Figura 3-2:** Plano de instalación y recreación 3D de ciclotrón AVF de TIARA.

### 3.5 VELOCIDAD DE EMULACIÓN

La velocidad con la que se produce la emulación del daño material repercute directamente sobre la viabilidad de la instalación. Por ejemplo, si se proyectara una instalación que produjera el daño a la misma velocidad que se produce en un reactor, el tiempo de irradiación debiera ser tan largo como la propia vida útil del reactor. Por tanto, se hace necesario el aumento de esta velocidad de emulación de daño para nuestra instalación.

Debemos definir por tanto un parámetro que indique dicha velocidad, teniendo en cuenta la velocidad con que se produciría el daño en un reactor comercial. Lo denominaremos *tasa de aumento de generación de daño*,  $\kappa$ . Este parámetro mide la relación entre la velocidad de daño generado por la instalación y la que se conseguiría en el reactor. Entonces tanto mayor sea  $\kappa$ , mayor será el número de posibles servicios prestados por la instalación.

Asignaremos  $\kappa = 1$  al primer prototipo de reactor comercial, *DEMO*, cuya velocidad de producción de daño es de 6,7 dpa/año (capítulo A.4 (pág. 148) del ANEXO A). Entonces suponiendo que la vida útil de un reactor de fusión es del orden de decenas de años, el valor de la *tasa de aumento de generación de daño* de nuestra instalación deberá ser algunos órdenes de magnitud superior a la unidad.

En la tabla 3-3 están calculados los valores de  $\kappa$  para diferentes instalaciones que tienen entornos de radiación neutrónica. Solamente *IFMIF* y *XADS* mantienen valores superiores a la unidad, pero mientras que la primera aún no está disponible, la segunda es utilizada para la transmutación del combustible nuclear quemado de las centrales de fisión.

**Tabla 3-3:** Tasas de aumento de generación de daño, hidrógeno y helio

		sin dimensiones				
	DEMO	IFMIF	ESS	XADS	HFR	BOR60
$\kappa$	1	0,66-1,81	0,16-0,33	1,25	0,08	0,66
$\kappa_H$	1	0,80-1,94	0,13-0,29	13,10	0,002	0,01
$\kappa_{He}$	1	0,78-1,88	0,078-0,19	4,13	0,003	0,02

Datos tomados de P. Vladimirov [88] y S. SIMAKOV [54]

En esta tabla además pueden apreciarse los parámetros  $\kappa_H$  y  $\kappa_{He}$ . Estos parámetros son análogos a la *tasa de aumento de generación de daño*  $\kappa$ , pero no hacen referencia a la gene-

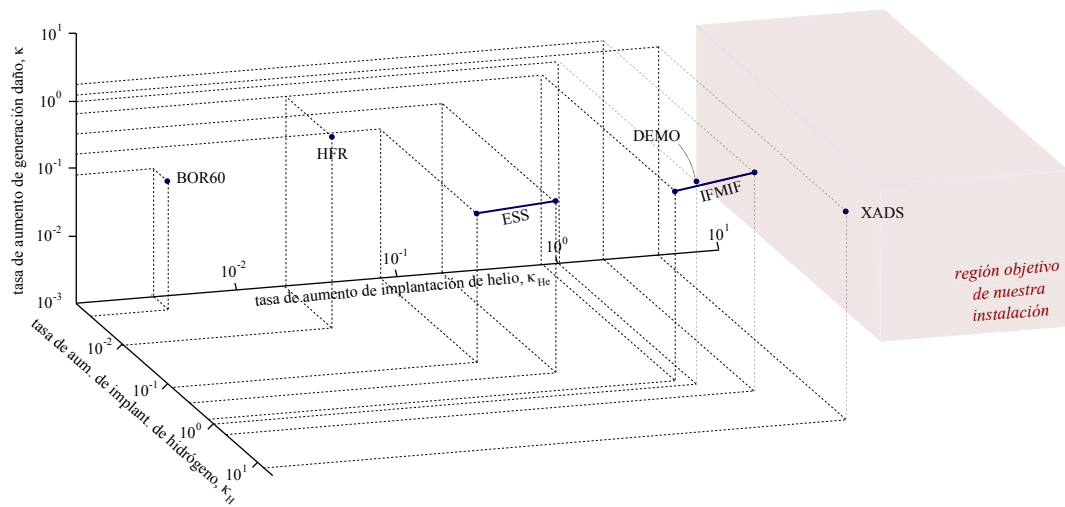
ración de daño, sino a la implantación de átomos de hidrógeno y de helio, respectivamente. El motivo de tener en cuenta estas implantaciones es demostrado en el subapartado A.2.1.2 (pág. 109) del ANEXO A, pues los neutrones al interactuar con la materia, además de desplazar los átomos de la red, producen la transmutación de algunos de ellos. Siendo alta la probabilidad de que aparezcan impurezas de hidrógeno y de helio, que migrarían por el material aumentando la modificación de sus propiedades. Es por tanto recomendable que en toda instalación que emule el daño neutrónico mediante iones, se proceda a la implantación simultánea de átomos de hidrógeno y de helio, pues es muy baja la probabilidad de que los propios iones produzcan dichas transmutaciones.

Aunque en el capítulo 1 (pág. 2) se estableció la propuesta de un sistema de implantación de iones como posible proyecto paralelo al presente, con objeto de facilitar su posible desarrollo anticiparemos en este apartado los valores que debieran adoptar  $\kappa_H$  y  $\kappa_{He}$ .

Al igual que como se ha hecho con  $\kappa$ , tomaremos *DEMO* referencia para asignar  $\kappa_H = 1$  y  $\kappa_{He} = 1$ . Las tasas de generación de impurezas en este reactor se situarían en aproximadamente 275 appm/año y 75 appm/año, para el hidrógeno y helio respectivamente, en un material de hierro. Según el mismo razonamiento que hicimos para  $\kappa$ , los valores de  $\kappa_H$  y  $\kappa_{He}$  para un posible sistema de implantación debieran ser varios ordenes de magnitud superiores a la unidad.

En la figura 3-3 están representados los datos correspondientes a las instalaciones de la tabla 3-3, pero adicionalmente se ha añadido una región en la que debiera operar nuestra instalación, y que corresponde a aquellos puntos cuyas tasas de aumento sean superiores a la unidad, es decir, que sean superiores al punto de operación de *DEMO*.

No obstante no se recomienda total libertad para el establecimiento de los valores de  $\kappa_H$  y  $\kappa_{He}$  para un posible futuro sistema de implantación. Ello es debido a que como demuestra K. Farrell [37], no se mantiene la validez del principio de superposición en los fenómenos de irradiación de materiales. Motivo por el cual debe mantenerse constante el ratio de producción de daño y de implantación en los valores característicos de *DEMO*,



**Figura 3-3:** Tasas de aumento de generación de daño, hidrógeno y helio

que según P. Vladimirov [88] se mantienen en valores de 41 y 11 para el hidrógeno y para el helio, respectivamente.

## 4 DEFINICIONES

**acelerador:** «Instalación en que partículas subatómicas con carga eléctrica, como los protones y electrones, se aceleran por la acción de campos eléctricos y magnéticos, que las dota de altas energías» (según la *RAE*).

**appm:** La unidad *appm* se refiere a número de átomos por cada millón de átomos de referencia.

**calentamiento del plasma:** La aplicación de esta energía puede realizarse mediante el uso de microondas o mediante la aplicación de un haz de partículas neutras (entiéndase por «neutras» como de pequeña sección eficaz de interacción, tanto eléctrica como nuclear), tangencial al movimiento del plasma. El objetivo principal del futuro reactor experimental *ITER* será demostrar que la aplicación de esta energía es inferior a la energía obtenida por las reacciones nucleares.

**CAS (número):** Acrónimo procedente de *chemical abstract service*. Identificación numérica para los compuestos químicos emitida por la *American Chemical Society*.

**ciclotrón:** Acelerador de partículas electrostático tipo orbital, que hace uso de campos magnéticos para el confinamiento de partículas cargadas eléctricamente en una geometría de espiral. Las partículas son aceleradas repetidas veces por la acción de una fuerza de naturaleza electrostática, que se sitúa estratégicamente a lo largo de sus trayectorias.

**combustible fusión nuclear:** El combustible de una central de fusión no está formado por deuterio y tritio, sino por deuterio y el isótopo-6 del litio. El motivo es que el tritio, aún presente en el agua del mar, lo está en pequeñas cantidades, pues su tiempo de vida es corto y solamente es regenerado por la interacción de los rayos cósmicos con los elementos ligeros de los gases atmosféricos. Motivo por el cual el difícil su concentración comercial. Sin embargo, puede producirse artificialmente en la reacción nuclear entre un neutrón y un isótopo de litio, tanto el-6 como el 7.

Por tanto, la generación de tritio se produce en el interior del reactor, y así también se evita la manipulación de un isótopo radiactivo. En los reactores de fusión se pretenderá usar el isótopo-6 del litio, pues el isótopo-7 regenera el neutrón incidente, dificultando en el control de su multiplicación en cadena.

**computación cuántica:** Posible futuro concepto de computación, que sustituye el uso de la lógica basada en un sistema discreto determinista, como el sistema binario aplicado al paso o no de corriente eléctrica, por otra basada en un sistema continuo no determinista, que hace uso de la distribución de probabilidad de los estados cuánticos de espín de partículas subatómicas. Mientras que en el primero la unidad elemental de información (el *bit*) puede adoptar uno solo de los dos estados posibles, en el segundo, la unidad elemental de información (el *qubit*), puede adoptar ambos estados simultáneamente, aumentando entonces la potencia de cálculo.

**confinamiento del plasma:** La tasa de reacciones nucleares de fusión está condicionada por el confinamiento de sus reactivos, pues la repulsión electrostática impide la aproximación requerida para la interacción nuclear. Las principales técnicas para conseguir esta aproximación, son el confinamiento inercial y el confinamiento magnético. La primera de ellas consigue la aproximación de núcleos mediante el aumento de la densidad, con el empleo de láseres distribuidos de forma adecuada. La segunda, no produce los niveles de aproximación de la primera, pero disminuye la repulsión electrostática, pues elimina los electrones orbitales de los átomos del combustible, facilitando la reacción nuclear. Al estado material producido en esta última tecnología, se le conoce como plasma.

**contrato de futuro:** Contrato que pospone la materialización de lo acordado. Se utiliza como producto de inversión o como garantía de suministro de materias primas, fijándose el precio al suscribirse, y quedando entonces libre de variaciones debidas a futuras oscilaciones en los diversos mercados de referencia.

**daño primario:** Daño producido en la red atómica de un material debido a la irradiación de partículas, y que consiste en el desplazamiento de sus átomos de sus posiciones de equilibrio.

**degradador:** Mecanismo utilizado para modificar el espectro energético de un haz de partículas.

**DEMO:** Acrónimo procedente de *demonstration power plant*. Futuro primer prototipo de reactor comercial de fusión. Permitirá demostrar la viabilidad tecnológica, de seguridad y económica de una instalación térmica de generación eléctrica por medio de la fusión nuclear por confinamiento magnético.

**deuterio y tritio:** Deuterio y tritio son el isótopo-2 y el isótopo-3, respectivamente, del hidrógeno elemental.

**deuterón:** El deuterón es el ión positivo del deuterio.

**dpa:** Acrónimo procedente de *displacements per atom*. Unidad usada como medida del *daño primario*, que consiste en la evaluación del número de desplazamientos medio experimentados por cada átomo de la red de un material sometido a irradiación.

**ECRIS:** Acrónimo procedente de *electron cyclotron resonance ion source*. Técnica empleada para la ionización de partículas hasta alcanzar elevados estados de carga, cercanos a la mitad del número de protones de sus núcleos. Hace uso de la ionización mediante la interacción con electrones.

**efecto apantallamiento:** Disminución total o parcial de la acción de un campo electrostático, debida a la aplicación de otro de acción opuesta, y de alcance similar.

**efectos de la radiación:** Efecto que tiene la evolución del *daño primario* en la modificación de las propiedades macroscópicas de los materiales.

**emitancia:** Toda la información de un haz de iones puede recogerse en un espacio senario de fases, tres de ellas correspondientes a las posiciones de las partículas, y tres a sus momentos lineales. El área de la proyección de este espacio, sobre un subespacio binario formado por una fase de posición y su correspondiente fase de momento lineal, se conoce como *emitancia*.

**emular:** «Imitar las acciones de otro procurando igualarlas e incluso excederlas» (según la RAE). Aunque en la literatura consultada, el objeto del presente proyecto amplia-



mente sea denominado como simulación, el autor ha considerado más idóneo el uso del concepto de emulación.

**energía nuclear:** Fuente energética que consiste en el aprovechamiento de la energía térmica producida en las reacciones nucleares exotérmicas. Generalmente se aprovecha la energía procedente de las reacciones nucleares de fisión y de fusión.

**estado de carga:** Propiedad intrínseca de algunas partículas subatómicas, que condiciona sus comportamientos ante la presencia de campos electromagnéticos, así como también la naturaleza de los que propiamente generan.

**FRENKEL (par):** Se trata de aquel par formado por una vacante y un intersticial. Es decir, el formado por el hueco o vacante que deja un átomo de la red de un material cuando es desplazado de su posición de equilibrio, tras recibir energía por la interacción con otra partícula, y el propio átomo cuando queda incrustado en dicha red formando un átomo intersticial.

**fuentes masiva de energía:** Aquella fuente de energía de la que emanan instalaciones, que con carácter individual, tienen elevado porcentaje de participación dentro de un mix energético determinado.

**fusión nuclear:** Reacción nuclear consistente en la unión de núcleos atómicos, atraídos por la interacción nuclear fuerte existente entre sus hadrones. La fusión de núcleos atómicos de menor masa que el del hierro, es exotérmica, mientras que en caso contrario es endotérmica.

**gas noble:** Elementos químicos de despreciable reactividad, y que en condiciones normales se encuentran en estado gas monoatómico.

**gases de efecto invernadero:** Gases acumulados en la atmósfera que actúan como resistencia térmica en la transferencia de calor entre el planeta Tierra y su entorno.

**IFMIF:** Acrónimo procedente de *international fusion materials irradiation facility*. Futura instalación nuclear, diseñada para recrear, incluso amplificar, las condiciones neu-

trónicas reales de un futuro reactor comercial de fusión. Con objeto de permitir el desarrollo y la certificación de los materiales candidatos a usar en estos reactores.

**ión:** «Átomo o agrupación de átomos que por pérdida o ganancia de uno o más electrones adquiere carga eléctrica» (según la RAE).

**ión pesado:** Se considera ión pesado a aquel ión cuyo núcleo tiene mayor masa que el núcleo del elemento helio.

**isótopo:** «Cada uno de los elementos químicos que poseen el mismo número de protones y distinto número de neutrones. Todos los isótopos de un elemento ocupan el mismo lugar en la tabla periódica y poseen las mismas propiedades químicas» (según la RAE).

**ITER:** Acrónimo procedente de *international thermonuclear experimental reactor*. Futuro reactor experimental de fusión nuclear, que tiene por objeto demostrar que la tecnología actual permite obtener energía térmica por medio de la fusión nuclear con una eficiencia superior a la unidad, es decir, se puede obtener más energía que la que consume el propio reactor.

**MIVOC:** Acrónimo procedente de *metal ions from volatile organic compounds*. Método consistente en la obtención de iones de elementos metálicos, mediante la utilización de compuestos orgánicos volátiles en las condiciones de ensayo.

**mix eléctrico:** Conjunto de fuentes energéticas que constituyen el aporte de energía eléctrica a un sistema.

**mix energético:** Conjunto de fuentes energéticas que constituyen el aporte de energía primaria a un sistema.

**PKA:** Acrónimo procedente de *primary knock-on atom*. Se trata de aquellos átomos de la red de un material irradiado que reciben directamente la energía de las partículas de la radiación. Tienen por tanto estos átomos la capacidad de difundir esta energía a los demás átomos de su entorno.

**plasma:** El plasma puede ser considerado como «el cuarto estado de la materia». La materia transforma su estado de gas a plasma cuando la aplicación de energía cinética (aumentos de temperatura) a los electrones de sus átomos, es suficiente como para que comiencen a liberarse.

**primera pared:** Elemento material que está expuesto directamente a las condiciones extremas de radiación de un reactor de fusión nuclear. Tiene por objeto dar soporte estructural al conjunto, además de servir de escudo protector frente a estas condiciones.

**RECOIL:** Se trata de aquellos átomos de la red del material que reciben energía por interacción con los *PKA*, o con otros átomos *RECOIL*, del mismo material, pero nunca directamente de la radiación.

**simular:** Representar algo, fingiendo o imitando lo que no es (según la *RAE*).

**supercomputadores:** Computador basado en una lógica discreta y determinista, con una potencia de cálculo muy superior a los computadores personales.

**tasa de aumento de generación de daño:** Parámetro definido en el presente proyecto, y que representa la velocidad a la que se reproduce el *daño primario* producido en los materiales de un reactor de fusión.

**tecnología de confinamiento magnético:** Una de las principales diferencias entre los reactores de fusión de investigación construidos hasta el momento, es el modo de aplicación de los campos magnéticos para confinamiento. Son dos las tecnologías más aceptadas, a saber, la tecnología *Tokamak*, y la tecnología *Stellarator*. Desde el punto de vista de eficiencia, los reactores *Stellarator* son más eficientes que los reactores *Tokamak*, pues aprovechan el campo magnético generado por el propio plasma. Sin embargo, en los *Stellarator* la estabilidad del plasma es más difícil de conseguir por este mismo motivo. Por lo que la tecnología candidata para el primer prototipo de reactor nuclear será la tecnología *Tokamak*.

## 5 SELECCIÓN DEL MÉTODO

Como se comentó en el apartado 2.5 (pág. 11) , la emulación del daño neutrónico de un reactor de fusión mediante radiación neutrónica, incluso más energética e intensa (como en el caso de *IFMIF*), necesita del desarrollo de una instalación de complejidad y coste significativos en relación con el desarrollo del propio reactor comercial. Motivo por el cual, si el presente proyecto llegara a demostrar la viabilidad de alternativas más sencillas, menos costosas e incluso más versátiles, quedaría «sobradamente» justificada su propuesta de desarrollo. En este capítulo, intentaremos «arrojar algo de luz» a esta cuestión.

### 5.1 MÉTODO SELECCIONADO

El rango de penetración de los protones en la materia puede ser significativo, pues su mínima carga eléctrica les permite viajar largas distancias sin interaccionar. Sin embargo los iones pesados depositan, de forma rápida y «brusca», grandes cantidades de energía una vez han accedido a un entorno material, quedando entonces muy reducido su poder de penetración. Por otro lado, la posible generación de isótopos radiactivos, por reacciones nucleares de los iones pesados con los átomos de la muestra, y de los equipos, puede considerarse despreciable para el rango de energía en que podría operar nuestra instalación (apartado A.2.2 (pág. 111) del ANEXO A), pero no puede hacerse esta suposición para el caso de los protones. Estas son las principales diferencias existentes en la interacción de estas dos partículas con la materia, y que motivarán su selección.

El elevado rango de penetración es requisito indispensable en nuestros objetivos, pues sería un handicap diferenciador respecto a otras instalaciones existentes. Por lo que en caso de decantarnos por la emulación con iones, estos deberían ser acelerados a energías muy elevadas con objeto de alcanzar mayores penetraciones, necesitándose entonces un potente acelerador. Ya se ha comentado que los protones no presentan esta limitación.

Una vez solucionado el problema de la penetración, nos enfrentamos al problema de la activación de los materiales de ensayo, y de los equipos. Los iones no presentan este problema, pero si lo hacen los protones, que aunque un correspondiente estudio debiera ratificarlo, existe alta probabilidad de que según el Real Decreto 1836/1999 [7] (modificado por el Real Decreto 35/2008 [8]) la instalación correspondiente fuere declarada *instalación radiactiva*, con la correspondiente necesidad de licenciamiento por parte del *Consejo de Seguridad Nuclear*. Esta solución no queda exenta de consecuencias, pues la activación de las muestras dificultaría, en gran medida, la realización de los ensayos de propiedades posteriores a la irradiación. Siendo necesaria la permanencia de los materiales de ensayo en recintos estancos, donde su manipulación se produjera por equipos de control remoto. No obstante, la disposición de equipos de ensayo con capacidad de operar durante la irradiación (y no sólo «post-irradiación») contribuiría a solucionar este problema, además de ser otro posible elemento diferenciador de la instalación, pero seguirían quedando patentes la activación de los equipos y su deterioro, que afectarían directamente a la operatividad de la instalación y a su difícil mantenimiento, por tratarse de un entorno radiactivo.

La exposición tabulada en la tabla 5-1 de los problemas que anteceden, así como de sus posibles soluciones, puede ayudarnos a valorar la influencia relativa de estos aspectos en nuestra instalación. Por lo que gracias a esta tabla dilucidamos que la mejor de las alternativas sería la emulación con iones pesados, pues aunque presente limitación en cuanto a su rango de penetración, ésta puede superarse con la selección de un potente acelerador, y además no cuenta con los grandes inconvenientes que presenta su rival en materia de activación radiactiva. Incluso, la alternativa del uso de protones también requeriría del empleo de un potente acelerador, aunque es cierto que no tan potente como el de la alternativa elegida. No obstante, véase el uso de la selección de un acelerador muy potente como una ventaja, pues permitiría una mayor amplitud en cuanto a la irradiación con diferentes elementos en rangos de energía más amplios.

Sin embargo el autor quiere enfatizar, que independientemente de la selección hecha, fenomenológicamente la mejor alternativa es la de los protones, pues tienen la capacidad de generar impurezas de hidrógeno y de helio por reacciones nucleares, al igual que lo hacen los neutrones en los reactores de fusión (subapartado A.2.1.2 (pág. 109) del

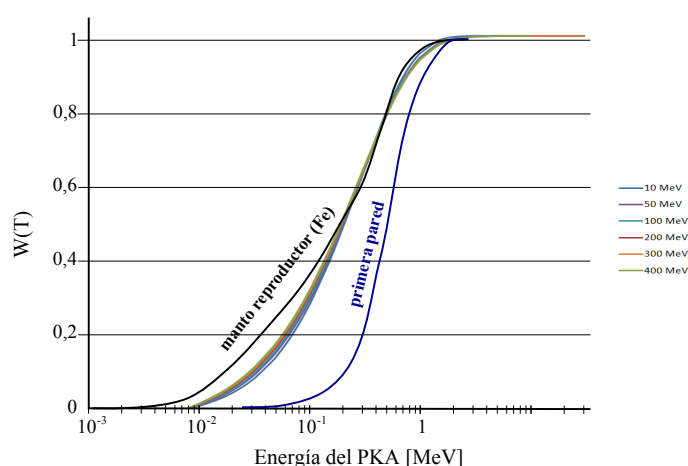
**Tabla 5-1:** Relación de problemas y de sus posibles soluciones en las alternativas para la emulación del daño neutrónico, mediante iones pesados y protones.

Alternativa	Elevado rango de penetración	Baja radiactividad	Potente acelerador	Necesidad de licenciamiento	Problemas en operación
iones pesados	NO	SI	SI	NO	NO
protones	SI	NO	SI	SI	SI

ANEXO A). Entonces, para una fiel emulación del daño neutrónico, la opción de los iones pesados debiera completarse con una implantación simultánea de iones de hidrógeno y helio, pero este proceder queda fuera del alcance del presente proyecto, y se establece como propuesta de proyecto voluntario en el capítulo 1 (pág. 2) .

Por otro lado, el *daño primario* generado por la radiación neutrónica es fenomenológicamente diferente al generado por la radiación con iones pesados. Motivo por el cual en el capítulo B.3 (pág. 162) del ANEXO B es necesario que se demuestre teóricamente la validez de uso de la radiación de iones para emular el daño neutrónico.

Como resumen a esta demostración, en la figura 5-1 se muestran las *funciones de daño* correspondientes a la radiación neutrónica y a la iónica, que como se comenta en el capítulo A.4 (pág. 148) del ANEXO A constituyen la mejor forma de evaluación teórica del *daño primario*.



**Figura 5-1:** Funciones de daño correspondientes a diferentes radiaciones.

## 5.2 DESCRIPCIÓN DE LA EMULACIÓN

El daño producido por la radiación neutrónica, de un reactor de fusión, en los materiales, tiene origen en la absorción de la energía del haz por parte de los átomos de la red. Esta transferencia de energía, se traduce en el desplazamiento de los átomos de su posición de equilibrio. Estos átomos desplazados pueden tener suficiente energía como para emigrar más allá de su posición inicial, transfiriendo de la misma forma que la recibieron, la energía a otros átomos de la red. Finalmente, estos átomos alcanzarán una nueva posición de equilibrio, que en la mayoría de los casos será completamente diferente a la que tenían originalmente, aumentando siempre la entropía del sistema. Entonces, por ejemplo, un material con estructura cristalina tenderá a tener una estructura amorfa. La ocurrencia de sucesivos desplazamientos, se traducirá en la modificación de las propiedades macroscópicas de los materiales en servicio, pudiendo producir fallo, en función del grado de sensibilidad que tenga la propiedad de interés ante la radiación. Puede consultarse el ANEXO A (pág. 95) para más información.

Nuestra instalación emulará este daño, produciendo los citados desplazamientos atómicos con el «bombardeo» de iones pesados. Es cierto que la naturaleza de un ión pesado y de un neutrón son completamente diferentes, por lo que el daño que causarán también lo será. La probabilidad de interacción de un neutrón con los átomos de la red de un material es relativamente baja, debido a que su ausencia de carga eléctrica solamente le permite interaccionar cuando su aproximación a otras partículas es suficiente como para que actúe la interacción nuclear fuerte. Además su pequeño tamaño comparado con el de átomo acentúa lo antedicho. Si los parámetros geométricos de la interacción son favorables, como para que la trayectoria del neutrón sea próxima a la posición de la partícula, con la que va a interaccionar, el efecto de la interacción fuerte irá aumentando tanto más se aproximen ambas partículas, pudiendo llegar a producirse reacción nuclear. Pero en caso contrario de parámetros no favorables, la interacción nuclear simplemente modificará la trayectoria del proyectil en un pequeño ángulo, y por el principio de acción-reacción, el núcleo atómico recibirá sólo una pequeña parte de la energía del neutrón incidente. Esta energía recibida puede ser superior a la energía potencial de enlace que mantiene el átomo en la red,

pudiendo llegar entonces a desplazarlo. En caso de no desplazamiento, vibraciones en torno a la posición de equilibrio son las encargadas de disipar la energía recibida en forma de calor. Desde el punto de vista del neutrón, éste sólo habrá perdido una pequeña fracción de su energía en la interacción. Entonces el trayecto de neutrón puede resumirse en la deposición distanciada de pequeñas cantidades de energía, de forma uniforme, a lo largo de toda su trayectoria. Por tanto, puede asumirse que la radiación neutrónica tiene un alto grado de penetración, produciendo de forma homogénea daño a lo largo de toda su trayectoria.

Sin embargo, en el caso de los iones pesados, la carga eléctrica efectiva es significativa. Esto es debido a que cuando un ión se desplaza por un medio material con elevada energía cinética, se reduce el efecto apantallamiento originado inicialmente por sus electrones orbitales sobre la carga eléctrica de los protones del núcleo. Puesto que la interacción electromagnética es de largo alcance, los iones interaccionan fácilmente con las cargas eléctricas de la red. En primer lugar, la carga efectiva positiva de los iones (debida a la reducción del efecto apantallamiento) es atraída por los electrones orbitales de los átomos de la red. En esta etapa, son los electrones de la red los que reciben la energía del ión, pero como no pueden adquirir un momento cinético elevado (su masa es muy reducida), disipan la energía recibida en forma de calor, y no desplazando a otros átomos de la red. Cuando los electrones de la red han recibido suficiente energía de ión, como para frenarlo en demasía, se produce la aproximación de éste hacia los átomos de la red. Es entonces cuando su carga efectiva positiva comienza a interactuar con las cargas positivas de los núcleos de la red, y es en esta etapa cuando se produce la transferencia de grandes cantidades relativas de energía hacia los núcleos de la red. Puede resumirse entonces que los iones inicialmente depositan de forma continua gran parte de su energía a los electrones de la red, pero esta deposición no se traduce en daño por desplazamiento sino que es disipada en forma de calor o de ionización, y es cuando han sido frenados en demasía, cuando transfieren la energía que les queda a los núcleos atómicos, pudiendo desplazarlos. Sin embargo, el largo alcance de la interacción electromagnética no les permite penetrar grandes distancias cuando transferían energía a los electrones, y menos aún cuando lo hacen a los núcleos atómicos, pues su energía cinética total se ha visto ya



muy mermada. Por lo tanto, se puede asumir que el daño por desplazamiento producido por la radiación con iones pesados ocurre a muy poca penetración, y además de forma localizada. En el párrafo anterior no se mencionó la interacción de los neutrones con los electrones, pues la única interacción que puede ocurrir entre ellos es la colisión directa, que geométricamente es poco probable.

Según lo expuesto anteriormente, la correlación entre el daño neutrónico y el daño por iones pesados monoenergéticos, consiste en la correspondencia entre la estrecha región de daño producida por los iones y la correspondiente región de daño de los neutrones. Esto limita en demasía el estudio de la modificación de las propiedades macroscópicas, pues los ensayos deben realizarse sobre zonas de daño de muy pequeño espesor, que además de dificultar tecnológicamente su realización, pueden ser muy influenciadas por los cercanos fenómenos de superficie y de contacto de fases (entre zonas de material dañadas y no dañadas), lo cuales podrían desvirtuar los resultados de los citados ensayos.

Por el contrario, es objetivo de nuestra instalación alcanzar elevados grados de penetración de daño, por lo que se propone un método para conseguirlo. Básicamente consiste en la irradiación de las muestras con iones de diferentes energías, que de esta forma producirían daño en diferentes zonas a distinta penetración. El conjunto de todas estas zonas podría entonces correlacionarse con una zona de daño neutrónico mayor.

Según los resultados de K. Farrell [37], estas radiaciones de iones pesados de diferentes energías debieran realizarse de forma simultánea, pues el *principio de superposición* no tiene validez en los fenómenos de producción de daño. Pero la excepción aparece en el caso que nos ocupa, pues la producción de daño ocurre en diferentes zonas, a distintas profundidades, y los electrones que son excitados en todas ellas vuelven a sus posiciones de equilibrio, disipando en forma de calor la energía que recibieron. Además, desaparecen los fenómenos de contacto entre fases, siempre y cuando se consiga la homogeneidad en las diferentes zonas de daño.

Una descripción detallada, y justificada de todo lo expuesto, puede encontrarse en el ANEXO A y en el ANEXO B.

## 6 CÁLCULOS

En este capítulo se pretenden realizar los cálculos para establecer los datos de partida que puedan servir para el desarrollo de una propuesta de instalación de emulación de daño. Estos datos de partida emanarán de las características del daño que se desea producir en la muestra de material irradiado.

### 6.1 ENERGÍA MÁXIMA DE LOS IONES

En primer lugar debe establecerse la máxima energía de los iones con los que irradiaremos las muestras materiales, para ello debe definirse el rango de penetración deseado para el daño. Como ya se ha comentado, este rango debe ser superior al alcanzado en otras instalaciones similares de emulación de daño para mejorar la calidad de los ensayos de propiedades realizados y disminuir la influencia de los efectos de superficie. Por otro lado, la consecución de este objetivo aportaría un elemento diferenciador para una posible instalación. Por tanto, hagamos revista de los rangos de penetración de otras instalaciones.

Tomaremos como referencia la irradiación con átomos de hierro sobre una muestra pura de hierro, puesto que se justifica el uso de este elemento en el apartado A.1.2 (pág. 100) del ANEXO A. Estos átomos serían acelerados por un hipotético ciclotrón de factor de diseño efectivo  $K_d^{ef}$ , con los valores tomados de la tabla 3-2 para cada una de las instalaciones tratadas. Estos valores pueden ser introducidos en la ecuación 1, suponiendo como ejemplo carga eléctrica de +12 para los iones, y de esta forma estimar las energías cinéticas máximas que alcanzarían hipotéticos iones de hierro en dichas instalaciones. Entonces con los datos de las energías, nos encontramos en la disposición de poder realizar las correspondientes simulaciones de daño, a fin de poder determinar los buscados rangos de penetración, utilizando para ello el código *TRIM* (subapartado A.3.2.3 (pág. 141) de ANEXO A). En la tabla 6-1 se recogen los resultados obtenidos.

**Tabla 6-1:** Rangos de penetración del daño debido a ficticias radiaciones de hierro +12, en las diversas instalaciones actuales.

Instalación	Energía, en megaelectronvoltios	Penetración, en micrómetros
DNE	21	3,14
IAE	108	8,32
TIARA	280	19,02
SACLAY	23	3,29
CARET	0,26	0,09
Hipotético 1	300	20,40
Hipotético 2	325	22,16
Hipotético 3	350	23,97
Hipotético 4	375	25,83
Hipotético 5	400	27,73

En esta tabla los rangos de penetración no indican realmente el máximo poder de penetración de cada instalación, pues aumentando el *estado de carga* de los iones, éstos son acelerados a mayor energía en un *ciclotrón*, y por consiguiente también aumenta el correspondiente rango de penetración. Entonces estos valores solamente indican el poder de penetración relativo a una radiación del isótopos-56 de hierro con *estados de carga* de 12+, con objeto de que puedan realizarse comparaciones. Con este supuesto, la mayor profundidad se consigue en la instalación *TIARA* con una penetración de 20  $\mu\text{m}$ . Este valor debiera ser superado por nuestra instalación, en al menos 10  $\mu\text{m}$  más. En la misma tabla, también se han calculado los valores de penetración para hipotéticas irradiaciones de hierro. En primera aproximación, la radiación con iones de hierro de **400 MeV** podría ser suficiente, pues el daño alcanzaría una profundidad de **27,73  $\mu\text{m}$** , e intentar conseguir mayor energía encarecería en demasía el coste del acelerador. Tomemos este valor como objetivo a conseguir, y más adelante con el estudio económico, el posible inversor podrá decidirá, en función del coste del acelerador, si sería rentable aumentar la penetración la energía de aceleración y por tanto la penetración.

## 6.2 MÍNIMO DAÑO MATERIAL

En el ANEXO A (pág. 95) , se establece adoptar como valor típico de tasa de daño por desplazamiento, en el hierro de la *primera pared* de un prototipo de reactor comercial de fusión, el valor de **6,7 dpa/año**. Para poder reproducir este daño sobre el mismo material, en el apartado B.4.1 (pág. 167) del ANEXO B se establece un método de cálculo para determinar el flujo de iones necesario. Los cálculos llevados a cabo determinan un flujo de  **$6,1 \cdot 10^8$  iones/(s·cm<sup>2</sup>)** de átomos de hierro de 400 MeV.

En cualquier caso, el valor del flujo final de iones de una posible instalación de emulación, deberá superar este valor en varios órdenes de magnitud si finalmente se desea reproducir el daño a una tasa mayor que la real, lo cual redundaría positivamente en el número de servicios prestados por la instalación. Evaluaremos esta relación de tasas, real y emulada, mediante el parámetro *tasa de aumento de generación de daño*  $\kappa$ , ya introducido en capítulos anteriores, y que por tanto deberá ser mayor que la unidad.

## 6.3 SUPERFICIE DE IRRADIACIÓN

En el subapartado C.1.6.2 (pág. 205) del ANEXO C, con la finalidad de facilitar la manipulación de las muestras, así como también de mejorar la aproximación de la emulación a la realidad, se propone irradiar la mayor superficie posible de las muestras. Para ello, ese anexo establece un área mínima de **2,25 cm<sup>2</sup>** de irradiación sobre las muestras.

## 6.4 HAZ MULTIENERGÉTICO

En el apartado B.4.2 (pág. 170) del ANEXO B se establece la necesidad de irradiar con un haz formado por iones de diferentes energías, para de esta forma conseguir la homogeneidad del daño producido a lo largo de todo el rango de penetración de la radiación en la muestra. Por tanto se propone la irradiación con haces de iones multienergéticos, con energía comprendidas entre 0 y 400 MeV.

## 6.5 PARÁMETROS GENERALES

En la tabla 6-2 se recogen los parámetros generales para la instalación propuesta por el presente proyecto. Tomaremos como referencia la irradiación con átomos de hierro de 400 MeV, para conseguir tasas de daño superiores a 6,7 dpa/año a una penetración máxima de 27,73  $\mu\text{m}$  en la muestra. Para ello haremos uso de flujos de iones superiores a  $6,1 \cdot 10^8$  iones/(s·cm<sup>2</sup>) sobre áreas de irradiación de 2,25 cm<sup>2</sup>. Por tanto la tasa de aumento de generación de daño deberá ser muy superior a la unidad.

Conviene por otro lado demostrar, que aunque aparentemente el flujo de átomos de la radiación parezca elevado, lo es sólo en apariencia. Y por tanto, se descarta la posibilidad de que la final implantación de estos átomos en la muestra pueda desvirtuar la emulación, y en especial si las partículas de la radiación y las de la muestra no son del mismo elemento. En efecto, la densidad del hierro es de  $8,5 \cdot 10^{22}$  átomos/cm<sup>3</sup>, por lo que el número de átomos que existen en una superficie de 1 cm  $\times$  1 cm sería de  $8,5 \cdot 10^{22}$  átomos. Comparando este valor con el flujo de la irradiación mínimo,  $6,1 \cdot 10^8$  iones/(s·cm<sup>2</sup>), se demuestra que para que ambos alcancen el mismo orden sería necesario irradiar la muestra durante  $10^{14}$  s, que equivalen a 3 000 000 años. Este cálculo sería el referente a una *tasa de aumento de generación de daño* de valor unidad, pero incluso suponiendo un valor de este parámetro de 10 000, el número de años sería de 300, igualmente elevado. Entonces se demuestra la validez de la suposición de no importante contaminación de la muestra por la implantación de las partículas causantes del daño.

**Tabla 6-2:** Datos de partida para el desarrollo del proyecto

Dato inicial	Valor
Elemento de referencia	hierro
Energía máxima	400 MeV
Máxima penetración de hierro en hierro	27,73 $\mu\text{m}$
Mínimo daño a producir	6,7 dpa/año
Mínimo flujo del haz	$6,1 \cdot 10^8$ iones/(s·cm <sup>2</sup> )
Mínima área de irradiación	2,25 cm <sup>2</sup>
Degradación del haz	Entre 0 y 400 MeV
Tasa de aumento de daño	>1

## 7 PROPUESTA DE INSTALACIÓN

En este capítulo procederemos a la descripción conceptual de los sistemas, y en consecuencia de sus equipos, con los que debiera contar nuestra una instalación de emulación que pretenda conseguir los objetivos ya especificados. Como ya se ha comentado anteriormente, la única norma existente en la actualidad y que pudiera proponer en cierta medida un esquema general para este tipo de instalaciones de irradiación material, es la norma ASTM E 521 96 [10]. Pero lamentablemente, esta norma centra más su atención en la fase de experimentación de irradiación de materiales que en el diseño de la propia instalación. Por otro lado, la bibliografía referente al desarrollo de otras instalaciones, es poco detallada, lo que nos pudiera dar la impresión de un claro «ocultismo tecnológico» en esta materia.

### 7.1 SISTEMAS PRINCIPALES

Con la información disponible, podríamos proponer en primer lugar, el desarrollo de un sistema de inyección de iones. El cuál estaría a su vez, formado por dos subsistemas.

El primero de ellos produciría la generación propiamente dicha, de los átomos que van a ionizarse o directamente de los iones, pero siempre con un reducido *estado de carga eléctrica*. Existen diversos equipos y métodos para alcanzar este cometido, pero en general los denominaremos *fuentes primarias de partículas*.

Una vez los iones han sido generados, deben ser acondicionados, concretamente con el aumento de sus *estados de carga* (para facilitar su posterior aceleración), hasta alcanzar el establecido por los parámetros de operación. Esta tarea es llevada a cabo por el segundo de los subsistemas, el de acondicionamiento iónico primario. Los equipos que llevan a cabo esta tarea confusamente suelen denominarse *fuentes de iones*, pues suelen obviar el método de generación primaria de partículas.

El conjunto de ambos subsistemas debiera permitir la regulación de la tasa de iones por unidad de tiempo, que caracterizará al haz final. Esta regulación puede llevarse a cabo, bien en la *fuentes primaria de partículas* aumentando el «poder de la fuerza» que ocasiona la generación de ellas (será de diferente naturaleza según la técnica usada), o bien en la *fuentes de iones*, regulando la tasa de extracción (limitada por la tasa de ionización). En el apartado 8.1 (pág. 44) se analiza esta cuestión más en detalle.

Una vez disponemos de una determinada tasa de iones por unidad de tiempo, y además continua, pues se supone régimen permanente, éstos debieran ser inyectados al sistema de aceleración. Este sistema les proporcionará la energía necesaria, establecida por los parámetros de operación, y que es función de la penetración del daño que se desea producir. Esta tarea de aceleración es llevada a cabo por los *aceleradores*. Por otro lado, este sistema debe procurar la menor pérdida y mayor homogeneización de partículas extraídas posible.

El haz de iones energéticos debe ser redirigido hacia la muestra material con que se está ensayando. Esta labor es tarea del sistema de guiado de haz, cuyo objetivo no solamente es el adaptar la instalación a las exigencias geométricas del edificio que la contenga, sino también la de corregir la tolerancia admitida en el ángulo de extracción del haz del acelerador. Los equipos que llevan a cabo esta función, son los *dipolos magnéticos*.

Como ya se ha comentado, es necesaria la obtención de un haz de iones multienergético. Los aceleradores actuales no son capaces de producir haces con estas características, por lo que para ello debe procederse a la degradación energética de los iones del haz. Esto se produce en el sistema de degradación de haz, con un equipo que denominaremos *degradador*. Se trata del único equipo que no estaría disponible comercialmente, por lo que debemos proponer su diseño conceptual.

Por otro lado, debe controlarse el área de la superficie de irradiación del haz sobre la muestra, con objeto de concentrar el daño deseado sobre una determinada región. De lo contrario, el daño producido podría ser superior o inferior al estimado. Para llevar a cabo esta tarea, el haz debiera atravesar un nuevo sistema, que lo expanda o lo contraiga en su sección. Este es el sistema de focalización, y los equipos utilizados son los *cuadrupolos*.

Una vez dispusiéramos de los iones que impactarían sobre la muestra material, éstos deberían ser nuevamente acondicionados, por el que hemos denominado sistema de acondicionamiento iónico secundario. Este acondicionamiento, al igual que el anterior, produciría la modificación del *estado de carga* de los iones, pero en este caso reduciéndolo hasta alcanzar su neutralización. El equipo encargado de ello se denomina *neutralizador*. El objeto de la neutralización reside no sólo en la posible influencia que los *estados de carga eléctrica* pudieran tener en la producción de daño, sino que facilita una posible propuesta de ampliación del presente proyecto. Esta propuesta de ampliación, como se comenta en el capítulo 1 (pág. 2) , consiste en la aplicación de un potente campo magnético externo y simultáneo a la irradiación. Su objetivo sería el estudio de efecto que tienen sobre los materiales los potentes campos magnéticos existentes en todo reactor de fusión. Estos campos magnéticos son los utilizados para el confinamiento del plasma en un reactor de fusión. Entonces si las partículas productoras del *daño primario* presentaran carga eléctrica efectiva, serían desviadas por la influencia de dicho campo magnético.

Finalmente el haz sería recibido por el sistema de recepción de haz, que albergaría la muestra a ensayar. Además este sistema podría albergar diversos equipos, que realizaran ensayos simultáneos sobre las muestras durante la irradiación, como por ejemplo ensayos mecánicos, ensayos eléctricos, etc. De esta forma podría estudiarse en tiempo real la modificación de las propiedades de los materiales de un reactor de fusión. También podría albergar subsistemas que regularan las condiciones de irradiación, como por ejemplo movimiento traslacional y de rotación de la muestra, modificación de la temperatura (parámetro de gran importancia en la difusión de los defectos producidos por los desplazamiento atómicos), etc. El equipo principal de este sistema, se denomina *cámara de ensayo*.

## 7.2 SISTEMAS AUXILIARES Y DE DIAGNÓSTICO

Consideramos necesaria la instalación de un sistema de diagnóstico, que permitiera el seguimiento instantáneo de los parámetros del haz, para así poder corregir las posibles desviaciones, que además podrían entonces ser tenidas en cuenta en el estudio de daño producido sobre las muestras, y así poder ser cotejado correctamente con los estudios



teóricos. Los equipos que podrían llevar a cabo esta tarea serían varios, entre ellos las *Faraday cup* y los *medidores de emitancia*.

Paralelamente, la instalación debiera dotarse de diversos sistemas auxiliares. Identificamos principalmente cuatro, a saber, a) sistema eléctrico, b) sistema de agua de refrigeración, c) sistema de generación de vacío, mediante *compresores* (debe tenerse presente que todas los sistemas que haz atraviesa debieran estar a *alto vacío*, pues la existencia de partículas residuales producirían su desviación y modificación energética) y d) sistema de control de operación, que permitiría la regulación centralizada de los parámetros de funcionamiento de la instalación.

En la tabla 7-1 quedan recogidos los equipos propuestos para la instalación, así como los sistemas a los que pertenecen.

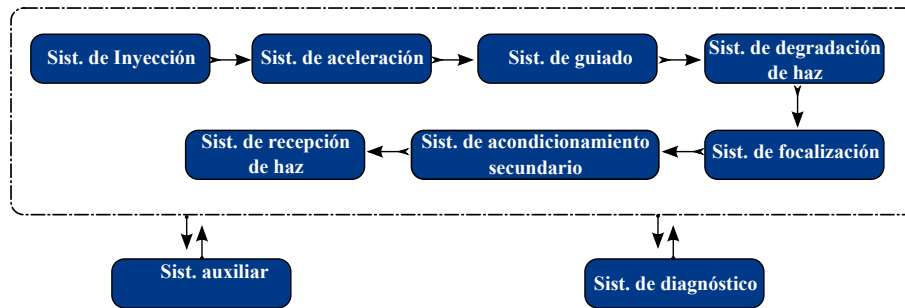
**Tabla 7-1:** Propuesta de sistemas en el esquema conceptual, así como de equipos asociados.

Sistema	Equipo
Subsist. de generación primaria	Fuente primaria de partículas
Subsist. de acondicionamiento primario	Fuente de iones
Sist. de aceleración	Acelerador
Sist. de guiado	Dipolos magnéticos
Sis. de degradación de haz	Degradador
Sist. de focalización	Cuadrupolos magnéticos
Sist. de acondicionamiento secundario	Neutralizador
Sist. de recepción de haz	Cámara de ensayo
Sist. de diagnóstico	Faraday cup y med. de emitancia
Sist. auxiliar	Conexión eléctrica, bombas hidráulicas, compresores, electrónica de control, etc

Aunque puedan establecerse algunos parámetros generales de operación para estos sistemas auxiliares, la selección de los mismos queda fuera del alcance del presente proyecto, pues entendemos que no se trata de un sistemas condicionadores de los otros, sino contrariamente sistema condicionados, y que por tanto sus dimensionamientos debieran realizarse «a posteriori».

En la figura 7-1 puede apreciarse la conexión propuesta para los diferentes sistemas, donde evidentemente el primero de los sistemas es el correspondiente al de inyección del haz

de iones a la instalación, y el último de ellos es el que alberga la muestra a ensayar, es decir, el sistema de recepción de haz. Todos los sistemas situados entre estos dos están conectados de forma correlativa. La excepción se encuentra en los sistemas auxiliares y en el diagnóstico, que mantienen conexiones con todos los demás.



**Figura 7-1:** Conexión propuesta para los diferentes sistemas.

## 8 DIMENSIONAMIENTO DE LOS EQUIPOS

En este capítulo procederemos al dimensionamiento conceptual de los equipos y elementos que componen los diferentes sistemas de la propuesta instalación de emulación. Se tratarán solamente aquellos equipos que se consideren como principales en dicha instalación, pues la propuesta detallada de la misma queda fuera del alcance del presente proyecto.

### 8.1 FUENTE PRIMARIA DE PARTÍCULAS

Como ya se expuso en el capítulo 7 (pág. 39) , el primero de los elementos es la *fente primaria de partículas*, gracias a la cual tendremos disponibles los átomos del elemento que queremos acelerar. Estos átomos deberán ser entonces liberados de la red atómica de una determinada sustancia.

En el subapartado C.1.6.1 (pág. 201) del ANEXO C se justifica la selección de la técnica MIVOC, como la más adecuada para nuestro cometido. Esta técnica hace uso de compuestos organometálicos con contenido en el elemento que queremos obtener. Requisito indispensable de estas sustancias es que aunque puedan ser sólidas o líquidas en *condiciones normales* de laboratorio, no lo sean en condiciones de *alto vacío*<sup>2</sup>. Tan solo será necesario introducir la muestra en el interior de una cámara, termodinámicamente cerrada, disminuir la presión hasta llegar a condiciones de *alto vacío*, y de esta forma tener parte, o la totalidad, del compuesto orgánico en forma de gas, ocupando todo el volumen de la cámara.

Para que la sublimación o evaporación del compuesto orgánico se produzca en condiciones de *alto vacío*, la presión de vapor de la sustancia debe ser superior a la presión existente en la cámara. Para el caso que nos compete, entenderemos la presión de vapor, como la presión por debajo de la cual, el compuesto pasa a estado gas. Por tanto, cuanto mayor

---

<sup>2</sup>Supondremos condiciones de *alto vacío* cuando la presión sea inferior a  $10^{-4}$  Pa

sea la presión de vapor del compuesto orgánico que usemos, menor será la reducción de presión que debemos practicar en la cámara, y menor será entonces la energía consumida por el sistema de vacío. Incluso también, será mayor la velocidad de transformación de estado, pues el sistema termodinámico estará más lejos del equilibrio mecánico. Entonces si con el sistema de vacío conseguimos mantener siempre la presión de la cámara por debajo de la presión de vapor, el equilibrio mecánico no se alcanzará nunca y la sustancia se evaporará completamente. Pero puede ser que la dificultad resida en mantener la presión tan reducida.

La presión de vapor es una propiedad dependiente de la temperatura, por lo que si su valor para el estado sólido del compuesto es inferior a la mínima presión que pueda conseguirse en la cámara, pero no ocurriera lo mismo con la presión de vapor del estado líquido, entonces debiera recurrirse a la fusión de la sustancia. Es en este caso, cuando es importante la temperatura de fusión del compuesto, ésta no debe ser superior a unos pocos centenares de grados centígrados, pues de lo contrario, debiéramos de recurrir a potentes hornos, con el consumo energético que ello conllevaría.

A medida que las moléculas de la sustancia comiencen a evaporarse (o sublimarse), tenderán a aumentar la presión de la cámara. Por lo que si con el sistema de vacío no intentamos mantener constante la presión reducida de la cámara, podrán ocurrir dos cosas. La primera de ellas, que si la cantidad de sustancia introducida no fuera muy elevada, la presión de la cámara no alcanzaría nunca la presión de vapor, y entonces la sustancia se evaporaría completamente. O la segunda, que la cantidad de sustancia si fuera suficientemente elevada, y entonces, antes de que se produjera su completa evaporación, la presión de la cámara hubiera igualado a la presión de vapor, tendiendo entonces parte de la sustancia en estado sólido.

En la figura 8-1 se observa la conexión que adoptaremos entre la *fente de partículas* y la *fente de iones*. El compuesto orgánico se introduce en la *cámara MIVOC*, que se conecta axialmente a la *fente de iones*. De esta forma cuando el sistema de vacío reduce la presión por debajo de la presión de vapor, el compuesto comienza a evaporarse, y puesto que la presión existente en la *cámara de ionización* es menor que la de la *cámara MIVOC*, las

partículas de gas fluyen por el conducto que las conecta hacia la cámara de menor presión. Una vez en la *cámara de ionización* de la *fuentes de iones*, las partículas se ionizan hasta alcanzar el estado de carga deseado, momento en el cual son extraídas al *acelerador*.

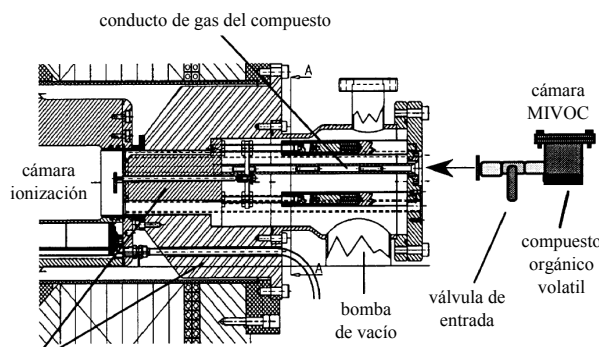


Figura propiedad de H. Koivisto [43]

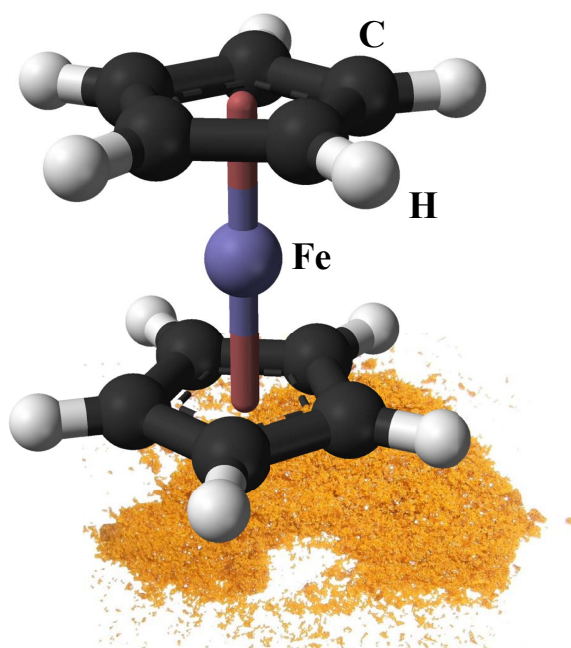
**Figura 8-1:** Conexión de la fuente primaria con la fuente de iones

Mediante la técnica *MIVOC*, es posible regular la tasa de iones que se extraen al acelerador, pues cuantas más partículas gaseosas halla en la *cámara de ionización*, mayor será la probabilidad de que interaccionen con los electrones y se ionicen. Podemos identificar tres parámetros que regulan la evaporación, a saber, a) la presión de vapor del compuesto, b) la presión de vacío de la cámara, y c) la temperatura. El parámetro a) lo regulamos mediante la selección del compuesto adecuado, el b) con el *sistema de vacío*, y el c) con la incorporación de un pequeño horno que permita aumentar la temperatura de la sustancia.

## 8.2 COMPUESTO ORGANOMETÁLICO

Puesto que para el dimensionamiento de la instalación estamos suponiendo irradiación con átomos de hierro (en el apartado A.1.2 (pág. 100) del ANEXO A se demuestra la importancia del hierro para emular el daño neutrónico de la *primera pared* de un prototipo de reactor comercial), necesitamos una sustancia que los contenga en su estructura, además que reúna la especificación anteriormente expuesta, es decir, elevada presión de vapor. El compuesto organometálico adecuado para este caso es el *ferroceno* ( $Fe(C_5H_5)_2$ ) num. CAS 102-54-5 (selección hecha en el ANEXO C), que tiene una presión de vapor

de **340 Pa** y una temperatura de fusión de **172 –175K** (consúltese catálogo del producto en ANEXO D). En la figura 8-2 puede apreciarse la representación tridimensional de la molécula de *ferroceno* así como también el aspecto físico de su estado sólido.



*Imágenes propiedades de Disposición Benjah y de TMaster, cedidas al dominio público.*

**Figura 8-2:** Molécula de ferroceno y aspecto de muestra sólida

Procedamos a calcular la cantidad anual necesaria de *ferroceno*. El flujo mínimo de partículas con que debemos irradiar la muestra es  $6,1 \cdot 10^8$  iones/(s·cm<sup>2</sup>) sobre un área de 2,25 cm<sup>2</sup>. Por otro lado, en el apartado C.1.7 (pág. 208) del ANEXO C se establece como óptima una *tasa de aumento de generación de daño* de  $\kappa = 6400$ . Por tanto, la capacidad de irradiación de nuestra instalación, debiera ser de  $8,64 \cdot 10^{12}$  iones/s. La masa molecular del *ferroceno* es 186,036 g/mol, y por cada molécula de compuesto obtenemos un átomo de hierro. Entonces, suponiendo por exceso una operatividad anual del 100 % de la instalación, la cantidad anual necesaria de ferroceno debiera ser de  $\approx$  **0,1 g**.

### 8.3 CÁMARA MIVOC

La *cámara MIVOC*, como ya se ha comentado, será una cámara de vacío donde se produzca la sublimación, o evaporación según se trate, de la *fuentes primaria*. Procederemos al cálculo de sus dimensiones optimizando el consumo energético, tanto del sistema de vacío, como el del horno de calentamiento de la muestra. Como sustancia referente, utilizaremos el *ferroceno*.

Según la *ficha de datos de seguridad* del *ferroceno*, que podemos encontrar en el ANEXO D, la presión de vapor de este compuesto es 340 Pa a 100 °C. Entonces la *cámara MIVOC* deberá estar a una presión igual o inferior a 340 Pa, y a una temperatura igual o superior a 100 °C.

El consumo energético del sistema de vacío será menor tanto más cerca esté la presión de la cámara a la presión de vapor y tanto menor sea el volumen de esta cámara. Entonces, será suficiente trabajar con presiones de vacío entorno **100 Pa**. En cuanto al volumen de la cámara, será el mínimo, que a la presión de trabajo de 100 Pa, permita mantener la evaporación total del *ferroceno*. Realmente, no es necesario mantener la evaporación total del compuesto, pero de esta forma evitaríamos tener en cuenta la cinética del cambio de estado, que en algunos transitorios de irradiación, y dependiendo de la sustancia, podría no ajustarse a los tiempos operacionales. Por otro lado, en caso de incidente, la contención del *ferroceno*, o de cualquier otra sustancia, dentro de la cámara estará asegurada al trabajar con presiones inferiores a la atmosférica.

Suponiendo comportamiento ideal del vapor de *ferroceno*, pues a baja presión podemos despreciar las interacciones electrostáticas entre sus moléculas, el volumen que ocuparía en condiciones de 100 °C de temperatura, 100 Pa de presión, y 0,1 g de sustancia, vendría definido por la *ley de los gases ideales*, ecuación 2. Según esta ecuación, el volumen mínimo de la cámara debiera ser de 16,667 dm<sup>3</sup>. Éste sería el volumen al que podríamos mantener el *ferroceno* completamente evaporado al menor consumo energético por parte del sistema de vacío. Por otro lado, la continua extracción de moléculas de gas, repercute

en la continua reducción de la presión de la cámara, por lo que la evaporación total estará garantizada durante toda la operación.

$$PV = nRT \quad (2)$$

donde,

$P$ , es la presión de la cámara de vacío, expresada en pascales.

$V$ , es el volumen de la cámara de vacío, expresado en metros cúbicos.

$n$ , es la cantidad de ferroceno, expresada en moles.

$R$ , es la constante universal de los gases ideales, de valor  $8,314\,472\text{ J}/(\text{molK})$ .

$T$ , es la temperatura de la cámara de vacío, expresada en kelvin.

Se propone una geometría cilíndrica para la cámara MIVOC, pues es la que mecánicamente mejor resiste la diferencia de presiones, existentes entre exterior e interior. El volumen de esta cámara sería de **16,667 dm<sup>3</sup>**, que podría materializarse en un cilindro de diámetro **28,82 cm** y altura **25,55 cm**.

En cuanto al horno, o sistema de calentamiento, de la *fente de partículas*, debe permitir el calentamiento de la muestra a 100 °C. Analizando los resultados obtenidos por T. Hirasa-wa [44], obtenemos la ecuación 3, que permite estimar el calor específico,  $c$ , del *ferroceno*, en el rango de temperaturas comprendido entre 300 K y 500 K. Integrando esta ecuación en el rango de temperaturas comprendido entre 25 °C y 100 °C, y multiplicándola por la cantidad de sustancia de 0,1 g, obtenemos que **7,5 J** es la energía que debe suministrar el horno para que 0,1 g de *ferroceno* alcancen la temperatura de 100 °C partiendo de la temperatura normal de laboratorio de 25 °C.

$$c = 70,892 + 2,757 \cdot T \quad (3)$$

donde,

$c$ , es el calor específico del ferroceno, expresado en julios por kilogramos por kelvin.

$T$ , es la temperatura de la fuente de partículas, expresada en kelvin.

Por otro lado, el flujo de partículas que se extraen de la cámara MIVOC es  $8,8 \cdot 10^{12}$  iones/s, por lo que el gas disminuye continuamente su densidad, a la vez que si se mantiene constante la presión de la cámara (pues estaría conectada a la cámara de vacío de la *fente*



de iones), la temperatura del *ferroceno* debería aumentar paulatinamente. Este aumento de temperatura contribuye positivamente en el aumento de la presión de vapor del *ferroceno*, favoreciéndose nuevamente la evaporación.

#### 8.4 FUENTE DE IONES

En el apartado C.1.6 (pág. 199) se selecciona la tecnología *ECRIS* como la mejor de las opciones para constituir la *fente de iones* de nuestra instalación. Para irradiación con iones de hierro de 400 MeV, en el apartado C.1.7 (pág. 208) se establece, como parámetro óptimo de operación, la ionización hasta un *estado de carga eléctrica* de  $Z = +12$ . En el mismo apartado se anticipa una *tasa de aumento de generación de daño* de  $\kappa = 6400$ .

Si introducimos los valores seleccionados para el *estado de carga* y para la *tasa de aumento de generación de daño* en la ecuación C-29, (reproducida por la ecuación 4), tenemos la intensidad de corriente eléctrica de partículas de hierro, de valor **15,64  $\mu\text{A}$** . Esta corriente de partículas, reproducirá el *daño primario* producido en la *primera pared* de un reactor de fusión, a una velocidad 6400 veces superior a la real, y sobre una superficie de 2,25 cm<sup>2</sup> de muestra, siempre y cuando se disponga de los adecuados sistemas de guiado y focalización.

$$J = IS = 2,172\,789\,248 \cdot 10^{-4} \cdot Z\kappa \quad (4)$$

donde,

*J*, es la intensidad de corriente eléctrica de iones de hierro de 400 MeV, que debería proporcionar el ciclotrón, expresada en microamperios.

*I*, es el flujo de intensidad correspondiente al flujo de iones de hierro de 400 MeV, expresado en amperios por centímetro cuadrado.

*S*, es la proyección del haz de iones sobre un plano perpendicular a la dirección de su movimiento, expresada en centímetros cuadrados.

$\kappa$ , es el factor que indica el aumento de la tasa de generación de daño primario, en relación con la correspondiente a condiciones de operación de un reactor de fusión comercial, sin dimensiones.

*Z*, es el estado de carga eléctrica de los iones, sin dimensiones.

Tomaremos como referencia las fuentes de iones comercializadas por la empresa *Pantechmik*<sup>TM3</sup>. Entre sus productos, el que reúne los requisitos de nuestra instalación es el denominado como *Hypernanogan*®. Esta fuente de iones puede conseguir valores de intensidad de hasta 16,7  $\mu\text{A}$  para iones de hierro con estado de carga +12. En la figura 8-3, puede apreciarse una fotografía de este equipo.



*Fotografía propiedad de Pantechmik<sup>TM</sup>*

**Figura 8-3:** Fotografía de la fuente de iones *Hypernanogan*®

En la tabla 8-1 podemos apreciar las principales especificaciones de este equipo, datos proporcionados por el fabricante.

**Tabla 8-1:** Principales especificaciones de la fuente de iones *Hypernanogan*®

Especificación	Valor
Masa	400 kg
Frecuencia microondas	14,5 GHz-18 GHz
Potencia sist. radiofrecuencia	1,5 kW
Potencia reactiva	130 kV A-190 kV A
Voltaje de extracción	10 kV-35 kV

*Datos proporcionados por Pantechmik<sup>TM</sup>*

Debe tenerse en cuenta la elevada potencia reactiva consumida por este equipo, por lo que debiera colocarse un sistema capacitivo, que compensase en la *red eléctrica* el desfase inductivo producido por sus bobinas.

<sup>3</sup>Empresa especializada en el diseño, construcción y comercialización de fuentes de iones ECR.

## 8.5 ACELERADOR

Haremos uso de un *ciclotrón isócrono* como acelerador electrostático para nuestra instalación (justificación hecha en el apartado C.1.4 (pág. 193) del ANEXO C). Consideraremos que los principales elementos de coste de un *ciclotrón* son los polos magnéticos y las bobinas. El dimensionamiento de ambos requiere del conocimiento de la energía final de las partículas y de sus estados de carga, que para nuestra instalación son iones de hierro de 400 MeV y +12, respectivamente. Procedamos al dimensionado de ellos de forma individual.

### 8.5.1 POLOS MAGNÉTICOS

El parámetro más representativo de todo ciclotrón es su factor de diseño  $K_d$ , que puede obtenerse por medio de la ecuación 5 (obtenida de las ecuaciones C-31 y C-33). Nuestro *ciclotrón* tendrá entonces un factor de diseño de valor **156 MeV**.

$$K_d = E \frac{A}{Z^2} \quad (5)$$

donde,

$K_d$ , es el factor de diseño del ciclotrón, expresado en megaelectronvoltios.

$E$ , es la energía cinética de las partículas del haz de iones, expresada en megaelectronvoltios.

$A$ , es el número de nucleones que posee el núcleo de la partícula acelerada, sin dimensiones.

$Z$ , es número de cargas eléctricas elementales de la partícula acelerada, sin dimensiones.

Supondremos que nuestro *ciclotrón* cuenta con bobinas no superconductoras, por lo que un análisis de la «bibliografía» existente, permite establecer un valor moderado de densidad de flujo magnético,  $|\vec{B}|$  de valores comprendidos entre 1,0 T y 1,7 T, conseguidos en un *ciclotrón* no superconductor con la tecnología actual. La ecuación 6 (reproducción de la ecuación C-32), permite obtener el valor de la densidad de flujo magnético,  $|\vec{B}|$  necesaria en un *ciclotrón* de factor de diseño  $K_d$  y radio determinados  $R$ . Si tomamos como primera aproximación un valor de radio de 2,0 m, la densidad de flujo magnético requerida para alcanzar el factor de diseño deseado, sería de 0,9 T. Puesto que se trata de un valor

inferir al rango, podríamos incluso reducir el valor del radio hasta **1,8 m**. En este caso, tendríamos un valor de **1 T**.

$$|\vec{B}| = \frac{1}{R} \left( \frac{K_d}{C_1} \right)^{1/2} \quad (6)$$

donde,

$|\vec{B}|$ , es el valor de la densidad de flujo magnético aplicada en el ciclotrón isócrono, expresado en teslas.

$R$ , es el radio de los polos magnéticos, expresado en metros.

$K_d$ , es un factor de diseño del ciclotrón isócrono, expresando en megaelectronvoltios.

$C_1$ , es una constante de proporcionalidad, de valor 47,86 MeV/(m·T)<sup>2</sup>.

Por otro lado, la expresión empírica propuesta por W. Joho [107], representada por la ecuación 7, permite determinar de forma «grosera» la cantidad total de material magnético a utilizar en los polos magnéticos de un *ciclotrón* no superconductor. Entonces nuestro *ciclotrón* requeriría de **308,075 t**. En el apartado C.1.7 (pág. 208), se selecciona el **acero ASTM-A 1008**, normalizado por la norma ASTM A 1008/A 1008M 04 [12], como el material magnético adecuado para este cometido.

$$M = 5000 (K_d/1000)^{3/2} \quad (7)$$

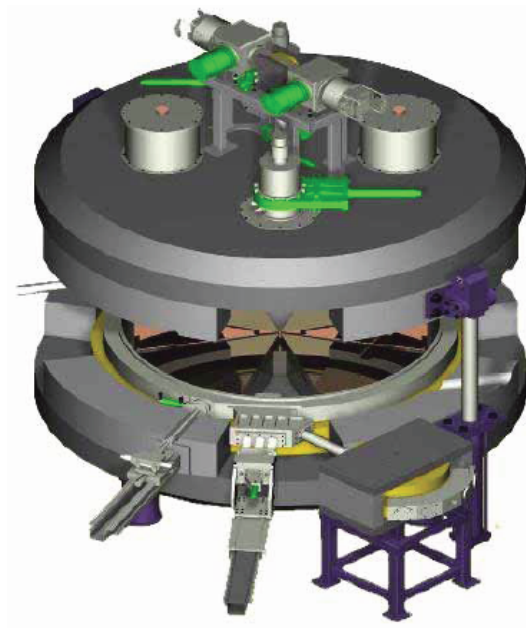
donde,

$M$ , es la masa de material magnético, en ciclotrón no superconductor, necesaria para obtener un factor de diseño,  $K_d$  determinado, expresada en toneladas.

$K_d$ , es el factor de diseño del ciclotrón, expresado en megaelectronvoltios.

En la figura 8-4 puede apreciarse una recreación tridimensional del *ciclotrón Cyclone® 70*, comercializado por la empresa IBA, donde se observan los elevados volúmenes de las zonas correspondientes a los polos magnéticos. Pero este *ciclotrón* no puede ser utilizado en nuestra instalación, puesto que su factor de diseño ( $K_d = 70$  MeV) queda por debajo de nuestros requisitos.

Por otro lado, el alcance del proyecto no llega al diseño del *ciclotrón*, por lo que no es posible llegar al cálculo de la *emitancia* del haz de iones conseguido por su confinamiento



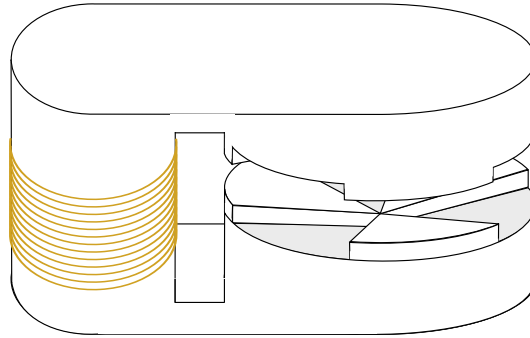
*Imagen propiedad de IBA<sup>TM</sup>, obtenida de su catálogo comercial*

**Figura 8-4:** Representación tridimensional de Cyclone<sup>®</sup> 70

magnético. Sin embargo, según los resultados de C. Tamburella [45], podemos tomar, para posteriores cálculos un valor de referencia inferior a  $40 \text{ mm} \times \pi \text{ mrad}$ .

### 8.5.2 BOBINAS

El campo magnético en los *ciclotrones* generalmente es creado mediante el flujo de corrientes eléctricas a través de disposiciones geométricas circulares, denominadas *bobinas*. La disposición espacial de estas bobinas puede ser muy variada e incluso compleja. El alcance del presente proyecto no comprende el diseño del *ciclotrón*, sino que tan solo requiere de la definición general de sus parámetros más relevantes, con objeto de poder estimar su coste aproximado de fabricación. Es por este motivo, que para el «grosero» dimensionamiento de las *bobinas* adoptaremos una disposición geométrica muy sencilla, como la mostrada en la figura 8-5. En esta figura, una única *bobina* «abraz» una de las ramas de un circuito magnético, donde el *entrehierro* constituye la zona de aceleración de los iones.



**Figura 8-5:** Disposición de bobinas tipo electroimán en *ciclotrón*

El circuito magnético mostrado estará formado por el material magnético usado para la construcción de los polos. Este material es ferromagnético, por lo que podemos hacer la suposición de que la densidad de flujo magnético es despreciable fuera de él. Por tanto, la aplicación de la *ley de Ampère* a nuestro circuito, puede mostrarse como por la ecuación 8.

$$NI = \frac{B_e}{\mu_o} l_e + \int_1 \vec{H} d\vec{l} = \frac{B_e}{\mu_o} l_e + H_p^* l_p \quad (8)$$

donde,

$N$ , es el número de vueltas con que se arrolla la bobina, sin dimensiones.

$I$ , es la intensidad eléctrica que circula por la bobina, expresada en amperios.

$B_e$ , es la densidad de flujo magnético existente en el entrehierro, expresada en teslas.

$\mu_o$ , es la permeabilidad magnética del vacío, de valor  $4 \pi \cdot 10^{-7} \text{N/A}^2$

$l_e$ , es la anchura del entrehierro, expresada en metros.

$H_p^*$ , es la excitación magnética media existente en el material magnético de los polos, expresada en amperios por metro.

$l_p$ , es la longitud del material magnético, expresada en metros.

Intentemos asignar un valor a cada uno de los términos de esta ecuación 8. La densidad de flujo magnético en el entrehierro  $B_e$ , es el parámetro que intentamos conseguir, y que en el subapartado 8.5.1 (pág. 52) se le asignó un valor de 1 T. Usaremos la permeabilidad magnética del vacío, pues supondremos condiciones de *alto vacío* en el interior del *ciclotrón*. En cuanto a la anchura del entrehierro  $l_e$ , podemos tomar como referencia en usado en

el ciclotrón *Cyclone*® 70, comercializado por la empresa *IBA Group*, que tiene un valor de 40 mm.

Para la estimación de la excitación magnética media, producida en el material magnético de los polos  $H_p^*$ , haremos la suposición de que todo el circuito magnético, incluido el entrehierro, tiene la misma sección. Por otro lado, la ley de divergencia nula de la densidad de flujo magnético implica el principio de anulación del flujo magnético total en superficies cerradas, como es por ejemplo nuestro circuito magnético. Por todo lo anterior, podemos hacer la suposición que las densidades de flujo magnético en el entrehierro y en el material magnético,  $B_e$  y  $B_p$  respectivamente, son iguales. Por tanto, para la determinación de la excitación magnética buscada, tan solo debemos conocer la historia del material magnético, que supondremos que se trata de una material virgen. Según J. M. Alarcon [17], para hierro laminado, a la generación de una densidad de flujo magnético de 1 T, le corresponde una excitación magnética de 5273 A/m.

Sólo queda la determinación de la longitud del material magnético,  $l_p$ . Para ello, calcularemos el volumen de material magnético a emplear y lo dividiremos por su sección. La masa de material magnético se determinó en el subapartado 8.5.1 (pág. 52) que tenía un valor de 308,075 t, así como también se determinó el radio de su geometría, 1,8 m. La densidad de este material es 7871 kg/m<sup>3</sup> (tabla C.1-7). Por tanto, la suposición de una geometría cilíndrica daría un valor para  $l_p$  de 3,845 m.

La aplicación de todos estos valores a la ecuación 8, proporciona un valor para la fuerza magnetomotriz  $NI$  de valor 52 106 A·vuelta. Tomando de la literatura un valor nominal para la densidad de corriente de las bobinas de 2 A/mm<sup>2</sup>, podemos hacer la suposición de que la sección de las bobinas es de 1 mm<sup>2</sup>, por lo que la intensidad que circularía por ellas sería 2 A, y por consiguiente el número de vueltas  $N$  sería 26 053. Suponiendo que el radio del material magnético sobre el que la bobina se arrolla es el mismo que el del ciclotrón, es decir, 1,8 m, podemos determinar que volumen total de las bobinas es de 0,295 m<sup>3</sup>, que en caso de ser de cobre (densidad 8960 kg/m<sup>3</sup>), la bobina tendría una masa total de 2,643 t.

## 8.6 DIPOLOS MAGNÉTICOS

El *dipolo magnético* es el elemento que utilizaremos para curvar la trayectoria de nuestro haz de partículas, según las necesidades geométricas de nuestra instalación. El presente proyecto tan solo intenta establecer una primera fase de diseño, por lo que tan solo se proyectara una sola *línea de irradiación*. Pero ello no descarta la posibilidad de futuras ampliaciones de líneas adiciones, destinadas a otros propósitos. Por este motivo, sólo haremos uso de un *dipolo magnético*, que ensamblaremos a la salida del *ciclotrón*, cuya función será la de ajustar la dirección del haz, para que interseque perpendicularmente a la muestra.

El *dipolo magnético* crea un campo magnético entre sus polos, de densidad de flujo magnético  $\vec{B}$ , que supondremos homogéneo en el espacio y constante en el tiempo. Cuando una partícula cargada atraviesa la zona entre polos, experimenta una fuerza perpendicular a su movimiento, que hace curvar su trayectoria, tal y como se demuestra en el subapartado C.1.1.2 (pág. 178) del ANEXO C. El giro de la trayectoria está definido por su *radio de curvatura*, que viene definido por la ecuación 9 (adaptación de la ecuación C-12). En esta ecuación, los parámetros  $A$ ,  $E$  y  $Z$  son característicos del haz de partículas, por lo que no podemos actuar sobre ellos, quedándonos la densidad de flujo magnético  $|\vec{B}|$ , como único parámetro libre. Entonces, será este parámetro el usado para la selección del *dipolo magnético*.

$$R = 14,450 \cdot \frac{\sqrt{AE}}{Z|\vec{B}|} \quad (9)$$

donde,

$R$ , es el radio de curvatura, expresado en centímetros.

$A$ , es el número de nucleones que posee el núcleo de la partícula, sin dimensiones.

$E$ , es la energía de la partícula, expresada en megaelectronvoltios.

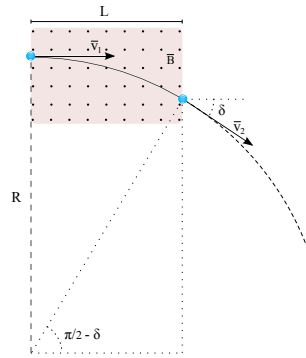
$Z$ , es número cargas eléctricas elementales de partícula acelerada, sin dimensiones.

$|\vec{B}|$ , módulo de la densidad de flujo magnético entre polos, expresado en teslas.

En la figura 8-6 puede observarse la curvatura que experimentaría una partícula cuando entra con una velocidad  $\vec{v}_1$  en un campo magnético constante  $\vec{B}$ , y perpendicular a la



dirección de su movimiento, característico de un *dipolo magnético*, repartido homogéneamente a lo largo de una longitud,  $L$ . La velocidad final de la partícula,  $\vec{v}_2$ , a la salida del dipolo, mantiene el mismo módulo que cuando entró, pero su dirección habrá sido girada un ángulo  $\delta$ .



**Figura 8-6:** Curvatura del haz debida a un *dipolo magnético*

Analizando la figura 8-6, podemos establecer una relación entre el ángulo con que es girada la trayectoria del haz  $\delta$ , las dimensiones del *dipolo magnético*  $L$  y el valor de la densidad de flujo magnético  $|\vec{B}|$ . Esta relación, viene recogida por la ecuación 10, con la que si disponemos de la longitud del *dipolo magnético*  $L$ , y de la densidad de flujo magnético  $\vec{B}$  que genera, podemos determinar el ángulo con que es girada la dirección de movimiento del haz de iones.

$$\sin \delta = \frac{LZ|\vec{B}|}{14,450 \cdot \sqrt{AE}} \quad (10)$$

donde,

$\delta$ , es el ángulo con que la dirección del haz de iones es girada por el campo magnético, expresado en radianes.

$L$ , es la longitud de la zona de acción del campo magnético del dipolo magnético, expresadas en centímetros.

Los dipolos comerciales más potentes, que hemos podido encontrar, son los proporcionados por la asociación *GMW<sup>TM</sup>*. En *dipolo* modelo 3474-140, puede generar un campo magnético, de valor de densidad magnética hasta 3 T, por lo que para curvar  $90^\circ$  nuestro haz de iones, según la ecuación 10 necesitaría de una longitud de zona de acción

de 60,074 cm. El valor de esta longitud, del modelo de dipolo citado es de 63,600cm, por lo que deberíamos operar con un campo magnético máximo de 2,834 T, de lo contrario el haz de iones colisionaría con las paredes del *dipolo*. Podría pensarse entonces en la selección de otro modelo diferente, pero el seleccionado es el único con capacidad para poder curvar nuestro haz de iones un ángulo de  $90^\circ$ , y bastaría con regular su excitación magnética, para ajustar el campo a nuestro requerimiento operacionales. En la tabla 8-2 vienen recogidas las principales especificaciones técnicas de este modelo de dipolo.

**Tabla 8-2:** Principales especificaciones técnicas del *dipolo magnético 3474-140*

Especificación	Valor
Densidad campo magnético	3 T
Longitud zona acción	63,600 cm
Intensidad	140 A
Voltaje	22 V
Potencia	10,6 kW
Resistencia total bobinas	0,54 $\Omega$
Masa	1800 kg
Refrigeración	10 agua
Caudal refrigeración	15 l/s
Presión de agua	2 · 10 <sup>5</sup> Pa

*Datos proporcionados por GMW<sup>TM</sup>*

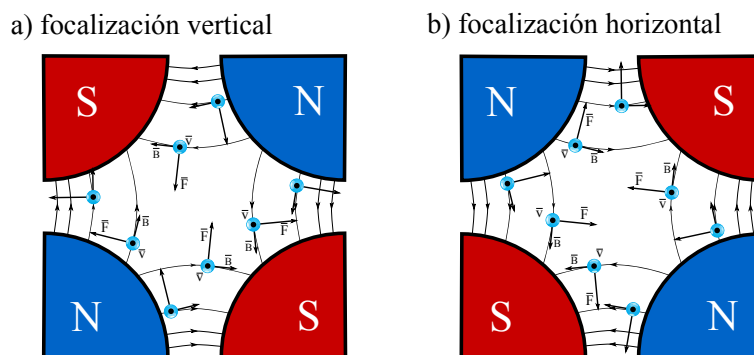
## 8.7 NECESIDAD DE FOCALIZACIÓN

En el apartado 8.5 (pág. 52) se ha tomado un valor máximo de  $40 \text{ mm} \times \pi \text{ mrad}$  para la *emitancia*. Podemos suponer que todas las partículas del haz de iones a la salida del *ciclotrón* tienen condiciones iniciales similares, tanto en posición como en momento lineal, por tanto según el *teorema de Liouville*, el espacio senario de fases que forman todas estas partículas, mantiene constante su volumen, pues en su camino hasta el *degradador*, pasando por los *dipolos* y *cudrupolos magnéticos*, no recibe ninguna aceleración. Podemos suponer entonces, que toda proyección de este espacio sobre cualquier subespacio binario de fases se mantiene constante, y en consecuencia la *emitancia* del haz supondremos que también se mantiene constante.

Por tanto aunque no corriamos la *emitancia* del haz, debemos disponer de elementos que si permitan corregir su dispersión, y de esta forma conseguir la incidencia sobre una superficie circular de 2,25 cm<sup>2</sup> de la muestra. De lo contrario, toda partícula se dispersaría en mayor cuantía tanto mayor fuere la distancia que separa la salida del *ciclotrón* de la muestra de material. Los elementos que realizan esta función son los denominados *cuadruolos magnéticos*.

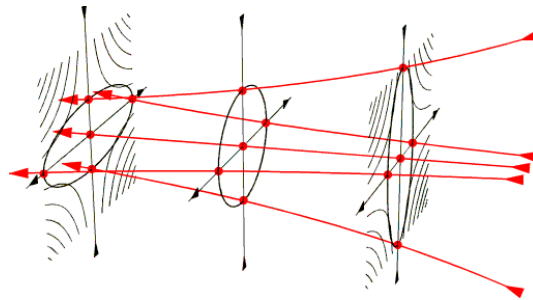
## 8.8 CUADRUPOLOS MAGNÉTICOS

El *cuadruolo* es un elemento formado por cuatro polos magnéticos idénticos, que permite la focalización de un haz de iones en una de sus direcciones. De esta forma, como se puede observar en la figura 8-7 a), toda partícula con movimiento perpendicular al del «papel», experimentaría una fuerza magnética, debida a las líneas de campo magnético generadas por los polos. En esta figura, se aprecia por tanto, que la componente vertical de esta fuerza tiende a concentrar la partícula al semiplano horizontal, mientras que a la vez tiende a alejarla del semiplano vertical. Sin embargo, si se rota noventa grados la polaridad de los polos magnéticos, la focalización se invierte, como puede observarse en la figura 8-7 b). Podemos hacer la suposición de que el valor de la densidad de flujo magnético  $|\vec{B}|$ , es linealmente proporcional a la distancia del centro del *cuadruolo*. De esta forma, debido a la simetría cuaternaria de revolución, podemos suponer que las componentes vertical y horizontal, de esta densidad de campo, son proporcionales a las distancias de sus semiplanos correspondientes, en un mismo factor de proporcionalidad  $K$ .



**Figura 8-7:** Focalización de haz de iones en *cuadruolo magnético*

Es por este motivo, que para lograr la adecuada focalización del haz de iones, suelen alternarse la disposición de cuadrupolos focalizadores verticales con cuadrupolos focalizadores horizontales, tal y como puede apreciarse en la figura 8-8. En esta figura puede apreciarse como un primer *cuadrupolo* produce una focalización vertical y una desfocalización horizontal. Entonces será el segundo *cuadrupolo*, supuestamente de polarización invertida, el que focalice horizontalmente.



*Imagen propiedad de Berkeley University*

**Figura 8-8:** Disposición alternada de *cuadrupolos magnéticos*

Analicemos una sola de estas direcciones, vertical u horizontal, pues el desarrollo de la otra será equivalente, y denominémosla  $d\vec{s}$ . Una partícula del haz se caracterizará por su posición  $(x, y)$  dentro del plano transversal a su movimiento, y por su velocidad  $\vec{v}$ . La proyección de la dirección de esta velocidad  $\vec{v}$ , sobre el plano formado por una dirección transversal,  $d\vec{s}$ , y la dirección del movimiento medio del haz,  $d\vec{l}$ , formará un ángulo  $\theta$  con la dirección  $d\vec{l}$ . Entonces una partícula libre, que tiene inicialmente una posición transversal  $s_1$ , y que avanza una distancia  $l$  en la dirección de movimiento del haz, tendrá una posición transversal final  $s_2 = s_1 + l \cdot \tan\theta$ . Este desarrollo puede considerarse idéntico al de si la partícula atravesara un *dipolo magnético*, pues el giro no afecta a la posición relativa de las coordenadas transversales.

Sin embargo, si tiene efecto en el caso de que atravesase un *cuadrupolo magnético*, pues como ya se ha comentado, el campo magnético no es homogéneo, contrario al caso del *dipolo*, lo que permite la focalización del haz. Entonces si se supone despreciable la longitud del *cuadrupolo* podemos suponer constantes las coordenadas transversales,  $s_1 = s_2$ , pero no

así la direcciones de las proyecciones de sus velocidades, que si variarán. Cuando una partícula con posición transversal  $s_1$  y dirección de la proyección de su velocidad  $\tan\theta$ , atraviesa un *cuadrupolo* de longitud  $L$ , experimenta un giro de trayectoria sin  $\delta$ , dado por la ecuación 10. Teniendo en cuenta, como ya se ha comentado, que el valor de la densidad de flujo magnético tiene un valor  $B_s = K \cdot s$ , un análisis trigonométrico, nos permite establecer que a la salida del *cuadrupolo*, la nueva dirección de la proyección de la velocidad,  $\tan\theta_2$ , vendrá dada por la ecuación 11.

$$\tan\theta_2 = \tan(\theta - \delta) = \frac{\tan\theta - \frac{LZKs_1}{(14,450^2 AE - L^2 Z^2 K^2 s_1^2)^{1/2}}}{1 + \tan\theta \cdot \frac{LZKs_1}{(14,450^2 AE - L^2 Z^2 K^2 s_1^2)^{1/2}}} \quad (11)$$

donde,

$\theta_2$ , es el nuevo ángulo que forma la proyección de la velocidad de la partícula con la dirección de avance medio del haz, a la salida del *cuadrupolo*, expresado en radianes.

$\theta$ , es el ángulo el mismo ángulo que el anterior, pero a la entrada del *cuadrupolo*, expresado en radianes.

$\delta$ , es el ángulo de giro que produce el *cuadrupolo*, expresado en radianes.

$K$ , es el factor de proporcionalidad que define el valor de la densidad de flujo magnético dentro del *cuadrupolo*, expresado en teslas por metro.

Se propone el uso de dos *cuadrupolos* invertidos, cuya referencia se tomará de los modelos comercializados por la empresa *Radiabeam Technologies*<sup>TM</sup>. Los *cuadrupolos* seleccionados son los de mayor poder desviador dentro del catálogo disponible, y ambos corresponden al modelo *EMQD-02-100-600*. En la tabla 8-3, pueden apreciarse las especificaciones técnicas de estos equipos. Datos proporcionados por el fabricante.

**Tabla 8-3:** Principales especificaciones del *cuadrupolo magnético EMQD-02-100-600*

Especificación	Valor
Gradiente magnético	20 T/m
Longitud magnética	21,6 cm
Intensidad	10 A
Resistencia total	1 $\Omega$
Potencia	100 W
Masa	32 kg
Refrigeración	aire

*Datos proporcionados por Radiabeam Technologies*<sup>TM</sup>

## 8.9 DEGRADADOR

En el ANEXO B (pág. 154) se define la necesidad de disponer de una radiación compuesta por iones de diferentes energías. Esta necesidad se establece en el capítulo 6 (pág. 35) como dato de partida de la instalación. Sin embargo, los diseños actuales de *ciclotrones* no están preparados para suministrar haces de partículas multienergéticos, por lo que debemos disponer de un elemento que lleve a cabo esta tarea, los *degradadores*.

Los *degradadores*, al tratarse de elementos singulares y de poco uso, así como característicos y específicos del uso al que estén destinados, no están disponibles comercialmente, ni tampoco existe una aceptación generalizada sobre su diseño.

Procederemos entonces a su definición conceptual, completamente adaptada a las necesidades de nuestra instalación. Motivo por el cual no haremos definición de él en el presente capítulo, posponiéndolo para el capítulo 9 (pág. 70) .

## 8.10 NEUTRALIZADOR

Ya se ha comentado que los aceleradores electrostáticos, como nuestro *ciclotrón*, necesitan que las partículas que aceleran tengan carga eléctrica. En el ANEXO B (pág. 154) se justifica el uso de iones pesados, que son partículas cargadas, para la emulación del *daño neutrónico primario*.

La elevada temperatura del combustible de un reactor de fusión nuclear (100 000 000 K para la reacción entre el deuterio y el tritio) hace que se encuentre en estado de plasma. Existe por tanto un elevado gradiente de temperatura entre el plasma y la *primera pared* de reactor, y si se permitiera el contacto material entre ambos, el conjunto tendería al equilibrio térmico (principio «cero» de la termodinámica), pero al ser mucho menos denso el plasma que el sólido, la temperatura de equilibrio estaría mucho más próxima a la temperatura de la *primera pared*. En consecuencia, el cambio drástico en los parámetros del plasma haría casi improbable la reacción de fusión. Se debe por tanto evitar el contacto material citado. Esto puede conseguirse mediante el confinamiento del plasma. El plasma,

al estar constituido por partículas cargadas (iones) en movimiento, presenta propiedades magnéticas, por lo que su confinamiento puede ser llevado a cabo mediante la aplicación de campos magnéticos muy intensos. Entonces, los materiales de la *primera pared* están sometidos también a fuertes campos magnéticos, y la evolución del *daño primario* producida por la radiación neutrónica podría<sup>4</sup> verse afectada por estos campos magnéticos.

Sería interesante tener en cuenta este posible efecto, por lo que se propone fuera del alcance del presente proyecto. Para ello sería suficiente con la aplicación de un intenso campo magnético sobre la muestra de material de estudio. Para facilitar la realización de esta propuesta, el presente proyecto propone la neutralización eléctrica de los iones de su haz antes de colisionar con la muestra. De esta forma, se evitaría que las partículas incidentes fueran desviadas por este campo magnético externo.

Esta función de neutralización es llevada a cabo por el *neutralizador*. Se propone como *neutralizador* una cámara de grandes dimensiones, dentro de la cual se produjera el intercambio de carga entre los iones del haz y las partículas de un determinado gas. Pero el elevado estado de carga (+12) de los iones de nuestro haz requiere de múltiples colisiones, que podrían frenar y desviar en demasía la velocidad de las partículas. Por lo que se propone también la realización de un detallado y complejo estudio de viabilidad.

Por lo que aunque en el presente apartado no hayamos podido dimensionar el *neutralizador* debido a su complejo estudio necesario, además de por no ser imprescindible para la consecución de nuestros objetivos, se ha justificado su propuesta como interesante fuera del alcance del presente proyecto.

## 8.11 DIAGNÓSTICO DE HAZ

Se propone el uso de elementos que permitan el diagnóstico de los principales parámetros del haz de iones, para su posterior control y ajuste. Este sistema se considera fundamen-

---

<sup>4</sup>Utilizamos el condicional «podría», pues a fecha de redacción del presente proyecto, el autor, bajo la tutela de sus correspondientes directores, no ha encontrado publicación alguna referente a investigaciones en el campo de la evolución de *daño primario* en condición de campo magnético intenso.

tal, pues permite asegurar la correlación teórica y experimental del daño por radiación, producido en las muestras materiales.

Podemos considerar la energía, la composición, la intensidad, la carga eléctrica y la geometría, como los principales parámetros a considerar en un haz de iones. La energía se controla y regula mediante el sistema de extracción de partículas del *ciclotrón*, que para el caso de iones positivos, será tipo *deflector* (apartado C.1.5 (pág. 197) ), pues aquellas partículas que no alcancen la energía umbral, en nuestro caso 400 MeV, no será extraídas. Mientras que la composición del haz, queda controlada por la pureza de la *fuentes primaria de partículas* usada, que para nuestro caso es el *ferroceno*.

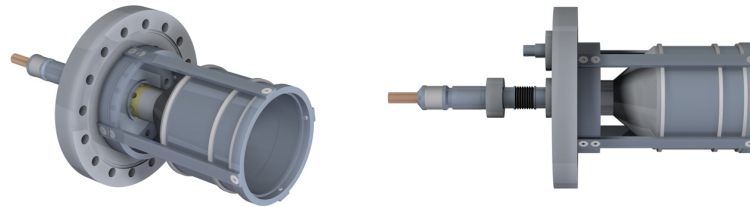
La intensidad del haz puede medirse directamente mediante una *Faraday cup*. Este elemento consiste en la disposición de un material metálico, que frena la totalidad del haz de partículas cargadas. De esta forma los iones de haz quedan implantados en la red atómica del elemento metálico, pero lo hacen una vez han sido neutralizados por los electrones del material. Esta neutralización se traduce en la producción de una corriente eléctrica, que es proporcional, tanto al flujo de iones como a su estado de carga a la intensidad eléctrica del haz. Posteriormente, esta señal debe ser amplificada, para poder ser interpretada por los dispositivos de control. Entonces si se conoce el flujo de iones, como es nuestro caso, pues queda determinado por extracción en la *fuentes de iones*, puede determinarse indirectamente también el estado de carga de los iones.

Para asegurar la recepción del haz de iones por la *Faraday cup*, haremos uso del *dipolo magnético*, que desviará el haz un ángulo determinado, para orientar el haz hacia dicho elemento de control.

El parámetro fundamental para el dimensionamiento de la *Faraday cup*, es la potencia del haz de iones, pues debe ser frenado en su totalidad por un elemento metálico, que podría dañarse. Nuestro haz de iones esta formado por  $8,784 \cdot 10^{12}$  iones/s de 400 MeV cada uno, lo que corresponde a una potencia aproximada de 563 W. La empresa *Dreebit<sup>TM</sup>* comercializa una *Faraday cup* preparada para medir haces de iones con potencias superiores



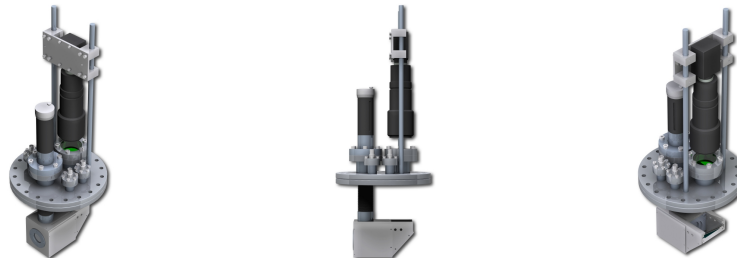
a 10 W. Este equipo es el modelo *High power Faraday cup*, y en la figura 8-9 podemos apreciar una recreación tridimensional de este equipo.



*Imágenes propiedad de Dreebit™*

**Figura 8-9:** Vistas tridimensionales de la *Faraday cup*

En cuanto al diagnóstico de la geometría del haz, podemos proceder al control de la emitancia de las componentes transversales al movimiento del haz. La empresa *Dreebit™*, comercializa igualmente un equipo para este propósito. Se trata del modelo *Pepperpot Emittance Meter*, y en la figura 8-10 pueden apreciarse diferentes vistas tridimensionales de este equipo.



*Imágenes propiedad de Dreebit™*

**Figura 8-10:** Vistas tridimensionales del *medidor de emitancia*

Este medidor de emitancia nos permitiría diagnosticar haces de iones de hasta 5 cm de diámetro, lo que se ajusta a nuestras necesidades, pues que el diámetro de nuestro haz sería de 1,69 cm. Sin embargo, este equipo requiere la incorporación de un elemento degradador previo, pues la máximas energía e intensidad admitidas de iones, son 50 keV y 1 nA, respectivamente.

## 8.12 CÁMARA DE VACÍO

La *cámara de vacío* será el recinto cerrado que albergará la muestra de material que se desea irradiar. Esta cámara debiera contar con una apertura para permitir la entrada del haz de iones pesados. Pero con objeto de facilitar futuras ampliaciones del presente proyecto, como por ejemplo la irradiación simultánea con iones de hidrógeno y de helio, se propone que a dicha cámara se le practiquen tres aperturas. Para la disposición de estas aperturas es preferible que la correspondiente a la irradiación con iones pesados permita la incidencia perpendicular de haz sobre la muestra, pues al tratarse de la irradiación más energética podría amplificar los fenómenos de «sputtering» (extracción de átomos de la superficie).

Por otro lado, esta cámara debe garantizar condiciones de alto vacío, para evitar la contaminación de partículas residuales en la muestra, así como el frenado energético de los iones del haz. Estimaremos presiones inferiores a  $2 \cdot 10^{-6}$  Pa, pues son las que se utilizan en la instalación TIARA [46].

El dimensionamiento y correspondiente diseño de la *cámara de vacío*, deben estar condicionados por los diferentes ensayos que se realizaran durante la irradiación de las muestras. La definición de los posibles ensayos realizados en ella queda fuera del alcance del presente proyecto, motivo por el cual no se procederá al dimensionamiento del citado elemento.

## 8.13 SUMINISTROS AUXILIARES

En este apartado, tan solo definiremos las necesidades de energía y materia externas, necesarias para la operación de la instalación. Podemos suponer que principalmente son dos, a saber, la energía eléctrica, y el agua de refrigeración.

En cuanto a la energía eléctrica, solamente tendremos en cuenta aquellos equipos cuyo consumo eléctrico sea relativamente importante dentro del conjunto. Por lo que despreciaremos el consumo energético del horno de la cámara MIVOC, el motor necesario para

el continuo movimiento del *degradador*, así como también los correspondientes al consumo de los equipos de diagnóstico.

Los consumos energéticos principales del *ciclotrón* son cuatro, a saber, a) los correspondientes al sistema de radio frecuencia que proporcionan energía a los electrodos del ciclotrón, para que éstos aceleren a las partículas del haz, b) los correspondientes al sistema de refrigeración, c) los correspondientes al sistema de vacío, y d) las pérdidas energéticas producidas en las bobinas. Para los valores de los tres primeros, tomaremos como referencia los relativos al *ciclotrón Cyclone<sup>®</sup> 70*, pero calcularemos el relativo las pérdidas indicadas en d).

La resistividad del cobre  $\rho$  tiene un valor de  $1,721 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$ , por lo que la resistencia total de las bobinas se obtendrá multiplicando este valor por la longitud total de las 26 053 vueltas, que es 294,652 km, y dividiéndolo por la sección de cada vuelta, es decir,  $1 \text{ mm}^2$ . La resistencia total de las bobinas será entonces de  $5071 \Omega$ . Aplicando la ley de pérdidas resistivas por *efecto Joule* a esta resistencia, y a la intensidad eléctrica que circula por ellas de valor 2 A, tenemos una potencia de pérdidas de 20,284 kW.

En la tabla 8-4 está recogida una relación de los principales consumos eléctricos, por unidad de tiempo, en función de los equipos de mayor consumo de la instalación.

**Tabla 8-4:** Principales consumos eléctricos de los equipos de la instalación

valores en kilovatios	
Equipo	Consumo
Fuente de iones	1,5
Bobinas	20,284
Sistema radio frecuencia	15
Sistema refrigeración	260
Dipolo	10,6
Cuadrupolos	$2 \times 0,1$
<b>TOTAL</b>	<b>307,584</b>

En cuanto al consumo de agua de refrigeración, el *ciclotrón* consume 6,16 l/s (dato obtenido de las especificaciones del *Cyclone<sup>®</sup> 70*), mientras que el *dipolo magnético* consu-

me 15 l/s (dato proporcionado por suministrador  $GMW^{TM}$ ). Por tanto, el consumo total de agua es de **21,16 l/s**, que evidentemente deberá operarse en circuito cerrado.

## 9 DISEÑO DEGRADADOR DE IONES

En el ANEXO B (pág. 154) se establece el uso de un sistema material para llevar a cabo la función de degradación. Por lo que en el presente capítulo procederemos a la selección de un sistema de este tipo de entre varios conceptos sugeridos por el autor. Una vez seleccionado el sistema, una breve y «grosera» exposición de su diseño es llevada a cabo. Finalmente, se considera importante hacer descripción de las especificaciones de los elementos más importantes del *degradador*, sus láminas materiales; pues una pequeña desviación de sus espesores desvirtuaría completamente la función de degradación objetivo.

### 9.1 CONCEPTOS DE DEGRADADOR

Cuando una partícula energética atraviesa un medio material cede parte de su energía a los átomos de la red, o incluso la totalidad si no llegara a atravesarlo. Cuanto menor sea el espesor del medio material menor será la energía cedida y mayor la probabilidad de atravesarlo. Este es el principio de funcionamiento del *degradador*, donde la partículas del haz serán frenadas de forma diferencial, es decir, unas cederán casi la totalidad de su energía, otras tan sólo una parte, y otras prácticamente no serán perturbadas. El resultado es la obtención de un haz multienergético, que se desea sea lo más continuo posible.

Algunas soluciones propuestas, van desde el uso de láminas materiales de diferentes espesores, que se van alternando ante la exposición al haz, hasta la aplicación de fluidos turbulentos y el aprovechamiento del fenómeno de *reflexión*. Analicemos sus ventajas e inconvenientes.

#### 9.1.1 CONCEPTOS TIPOS CUÑA

La solución más simple, sería el uso de una geometría material tipo «cuña», tal y como se representa en la figura 9-1. En esta figura se aprecia como una cuña, con movimiento ascendente y descendente, va exponiendo al haz de iones un espesor variable en función

del tiempo. Es importante que la pared vertical sea la que esté en contacto directo con el haz, para disminuir así los fenómenos de «*sputtering*» (arranque de átomos superficiales), pues la incidencia del haz de esta forma es perpendicular a la superficie, y de lo contrario existiría una componente de la velocidad de los iones paralela a la cara oblicua de la cuña. Debido a que el espesor efectivo de la cuña varía desde 1  $\mu\text{m}$  a 28  $\mu\text{m}$ , la refrigeración de la cuña por conducción no sería muy significativa, siendo sin embargo importante, la transferencia de calor por radiación al entorno (siempre y cuando los materiales alcanzasen temperaturas elevadas). No obstante, se propone la práctica de un conducto en la parte superior de la cuña, por la que podría circular un fluido refrigerante.

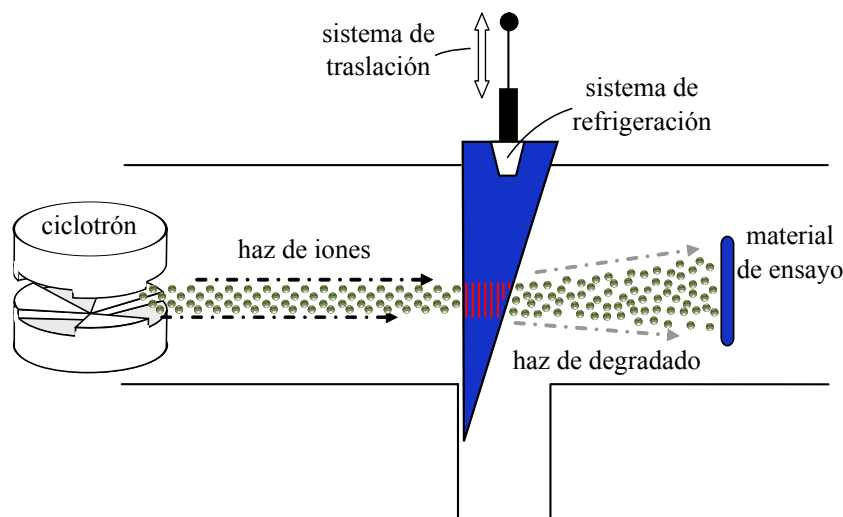
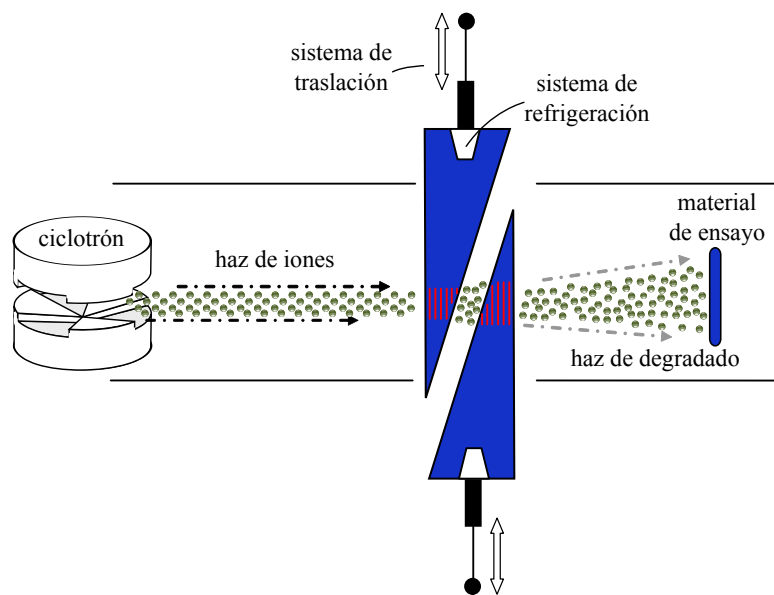


Figura 9-1: Concepto de *degradador* tipo cuña simple

Este modelo tiene la ventaja de ser un modelo sencillo y que ofrece un rango continuo entre los espesores máximo y mínimo, favoreciendo la producción de una haz de iones de espectro energético muy continuo. Por el contrario, el mecanizado de precisión para esta geometría es muy difícil conseguir para espesores del orden de micrómetros, puesto que no se podría asegurar la constancia de la pendiente, parámetro fundamental del *degradador*. Por otro lado, también se trata de un sistema con muy mala refrigeración, pudiendo dilatarse principalmente en las zonas de menor espesor, perdiéndose entonces la funcionalidad del *degradador*.

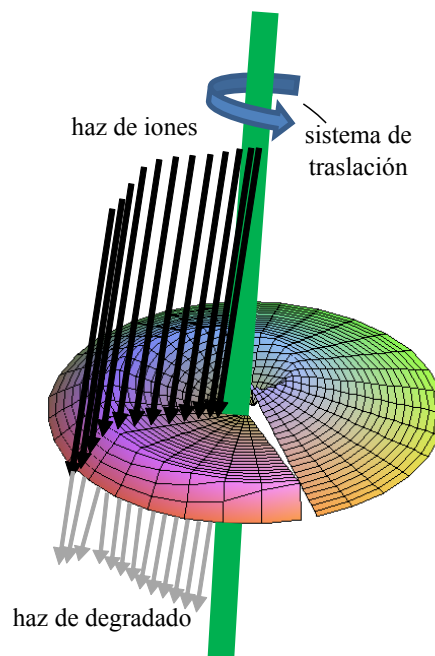
Otro de los problemas que presenta este concepto de *degradador*, es la diferenciación de frenado que sufre el haz de iones, es decir, en cada instante de tiempo la geometría de cuña hace que la sección del haz sea frenada de forma heterogénea, siendo siempre las mismas partes las que presentan mayor espesor. Entonces aunque el espectro multienergético esté siempre garantizado, el *daño primario* que experimenta la muestra es en todo instante más pronunciado en unas zonas que en otras. Esto podría desvirtuar la finalidad de los experimentos, pues podrían aparecer fenómenos de difusión de defectos no esperados, así como tensiones internas en el material de la muestra. Como solución a este problema, se propone el uso de dos cuñas sucesivas, ambas dotadas con movimiento de traslación de igual dirección, pero diferentes sentidos, tal y como puede apreciarse en la figura 9-2. De esta forma, el espesor efectivo a que estaría expuesto la trayectoria del haz, sería el formado por la suma de los espesores de ambas cuñas, y por tanto homogéneo en cada instante de tiempo.



**Figura 9-2:** Concepto de *degradador* tipo cuña doble

### 9.1.2 CONCEPTOS ROTATIVOS

Un diseño avanzado de cuña, que asegura que en todo instante la generación de un haz multienergético completo, es decir, presentando instantáneamente toda la variedad de espesores, podría ser el mostrado en la figura 9-3. De esta forma, una geometría material de disco iría rotando sobre un eje perpendicular, mostrando al haz, en cada instante, una cuña diferente, es decir, donde el máximo y el mínimo espesor irían variando de posición radial. Por tanto, el espesor variaría para de cada punto polar del disco, es decir, sería función del radio y del ángulo.



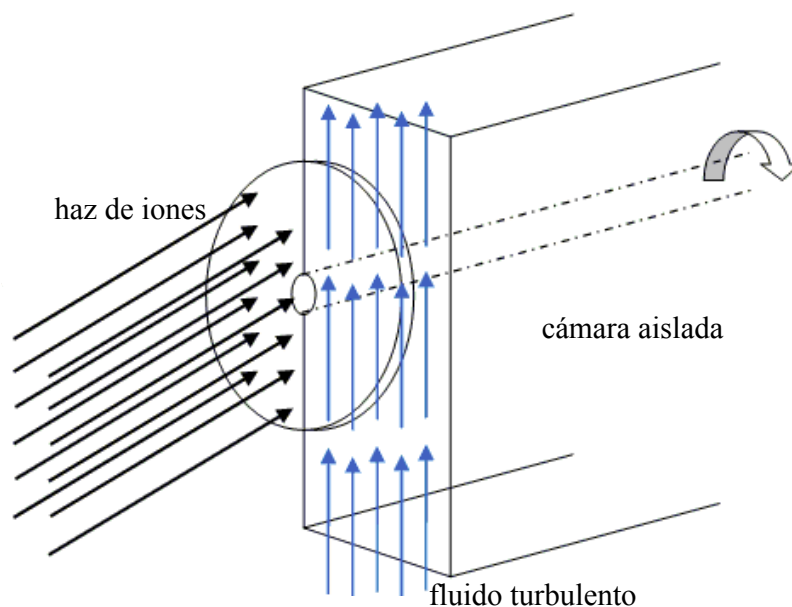
**Figura 9-3:** Concepto de *degradador* tipo cuña rotativa

La calidad del haz multienergético sería tanto mejor, tanto mayor fuere la velocidad de giro del disco. Pero se presentan nuevamente los problemas característicos de las geometrías tipo cuña, el difícil mecanizado, en especial en la geometría ahora tratada, pues como ya se ha comentado el espesor sería función del radio y del ángulo. Por tanto conseguir la superficie deseada del disco con una precisión aceptable, sería prácticamente inviable, técnica y económicamente. Y el otro problema es el relativo a la refrigeración, ya



que la transferencia de calor por conducción tan solo podría realizarse por el eje central, quedando la radiación como único sistema de transferencia significativo.

Una solución a esta deficiencia en la refrigeración podría ser la mostrada en la figura 9-4. En este concepto, una sección del disco material atravesaría la zona de irradiación, que debiera encontrarse en condiciones de *alto vacío*, mientras que la otra se encontraría en una cámara de refrigeración. Es esta última cámara, perfectamente aislada, un fluido turbulento estaría en contacto con una sección del disco, refrigerándolo por convección.

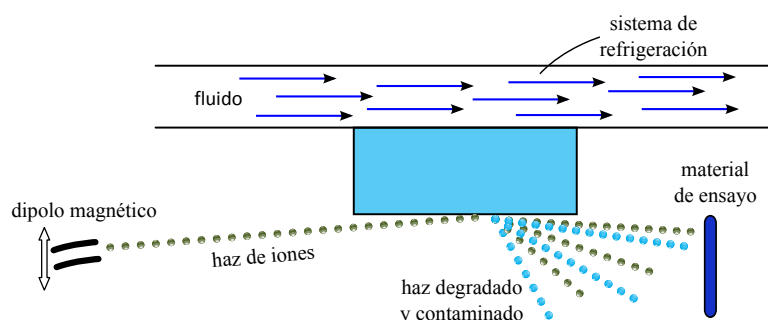


**Figura 9-4:** Concepto de *degradador* tipo rotativo

Pero este concepto presenta dos importantes inconvenientes. El primero de ellos es el relativo a la dificultad de aislamiento entre la cámara de *alto vacío* y la cámara de refrigeración, pues un mismo punto del disco está continuamente atravesando ambas cámaras, produciéndose pérdida de aislamiento. El otro inconveniente aparece por la posible erosión, por parte del fluido, sobre la fina superficie del disco, que aunque sea mínima, se requiere muy elevada precisión. Por otro lado las partículas de fluido refrigerante podrían contaminar la superficie del disco, y contaminar por ende al haz de iones.

### 9.1.3 OTROS CONCEPTOS

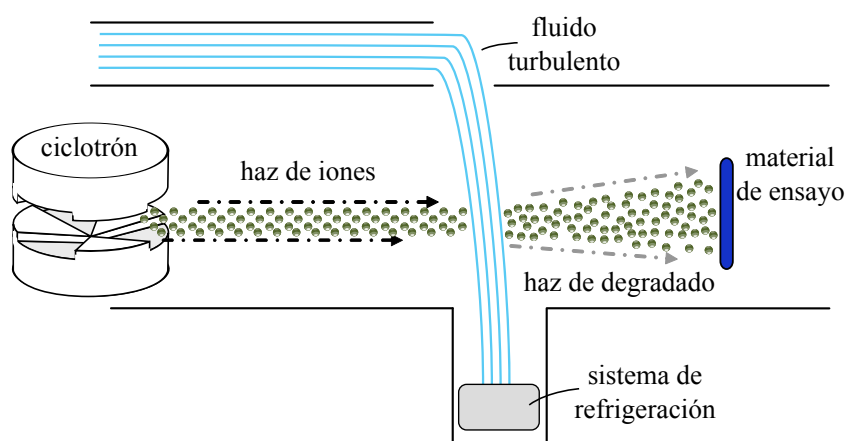
Un concepto alternativo, distinto al concepto tipo cuña, podría ser el mostrado por la figura 9-5. Este concepto de *degradador* podría denominarse «de reflexión», pues aprovecharía la reflexión (y no transmisión) de los iones de haz cuando colisionaran con su superficie. No sólo podrían aprovecharse estos iones, sino también los arrancados en la superficie del *degradador* debido a los fenómenos de «*sputtering*».



**Figura 9-5:** Concepto de *degradador* tipo de reflexión

De esta forma, los iones del haz no atravesarían *degradador*, sino que rebotarían en él, incidiendo sobre la muestra. Girando continuamente el ángulo de incidencia conseguiríamos el espectro multienergético buscado. Para aprovechar el aumento de rendimiento producido por los átomos que abandonan la superficie del *degradador*, estos debieran ser del mismo elemento que el haz de iones, de lo contrario lo contaminarían el haz. Incluso, el «arranque» de determinados átomos superficiales produciría átomos de muy baja energía, que podrían emular el mismo efecto que espesores superiores a 28  $\mu\text{m}$ . Este concepto puede contar con un excelente sistema de refrigeración, pues puede aprovecharse la refrigeración por convección de un fluido turbulento, tal y como se muestra en la figura 9-5. Incluso la superficie erosionada del *degradador* puede ser continuamente renovada, mediante una simple traslación del punto de incidencia del haz. Pero la dificultad estaría en el ajuste del ángulo de incidencia, pues simulaciones hechas con el código *TRIM* indicaron que para que se produjera un rendimiento aceptable de iones rebotados, el ángulo de incidencia debiera ser prácticamente nulo, con las dificultades técnicas, de ajuste y operación que ello supondría.

Otra alternativa conceptual, podría ser el uso de un fluido turbulento como medio material, tal y como se muestra en la figura 9-6. Este concepto, desde el punto de vista de la refrigeración sería perfecto, pues el fluido podría ser continuamente renovado, o dirigido a un intercambiador de calor. Sin embargo, la incertidumbre, a nivel atómico, de la densidad puntual de partículas, velocidad y posición, característica de todo fluido turbulento, anularía completamente la predicción y control de haz de iones degradado, no pudiéndose correlacionar los resultados experimentales con los teóricos.



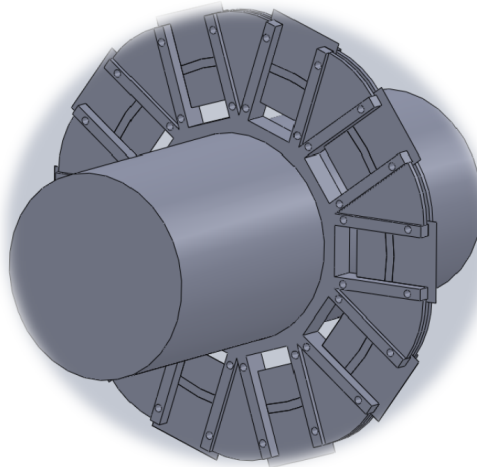
**Figura 9-6:** Concepto de *degradador* tipo fluido turbulento

## 9.2 CONCEPTO SELECCIONADO

Como diseño conceptual de *degradador* se propone entonces el uso de un sistema rotativo, pues analizando el apartado anterior, se constituye como la mejor de las opciones. El *degradador* estaría formado por dos discos, cada uno de los cuales como el mostrado por la figura 9-7.

Cada uno de ellos consiste en un soporte rotativo, al que se le acoplan láminas de diferentes espesores, las cuales actuarán como medio material para degradación del haz. La utilización de dos discos proporciona versatilidad al conjunto, en cuanto a variedad de espesores de lámina se refiere. Pues mientras que en uno de los discos pueden disponerse

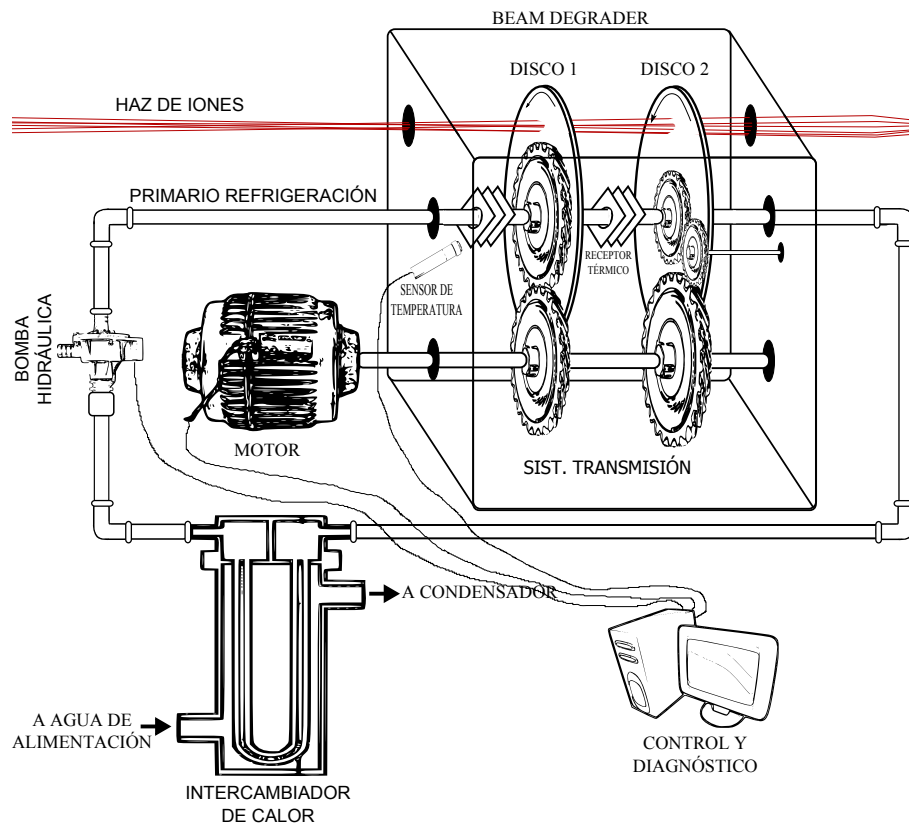
láminas de un orden de magnitud de espesor, en el otro pueden colocarse láminas un orden de magnitud inferior. De esta forma, una rotación de velocidad un orden superior para el segundo de los discos respecto al primero, permitiría la obtención de una mayor variedad de espesores para un mismo número de láminas.



**Figura 9-7:** Concepto definitivo de *degradador*

Por otro lado, al *degradador* propuesto debieran añadirse una serie de elementos anexos necesarios para su óptimo funcionamiento, tal y como se pueden apreciar en la figura 9-8. Entre los más importantes, encontramos un motor, responsable de comunicar el movimiento de rotación a los discos, un conjunto de engranajes, que forma el sistema de transmisión, que permite que los dos discos giren a distinta velocidad, para conseguir el efecto antes comentado. El primero de los discos se haría girar a la velocidad de rotación del motor, por lo que bastaría con la colocación de un par de engranajes de iguales dimensiones e igual número de dientes. Sin embargo el segundo de los discos requiere girar a una velocidad mayor, como ya se ha comentado, por lo que sería necesario el diseño de un correspondiente *tren de engranajes*.

En esta figura también se aprecian unos elementos denominados como receptores térmicos. Éstos tienen la finalidad de servir como focos fríos para la refrigeración de las láminas del *degradador*, mediante el mecanismo de transporte de calor por radiación térmica. Que-



**Figura 9-8:** Elementos anexos a *degradador* y conexión

dan descartados los mecanismos de conducción, debido a que el espesor de la láminas es del orden de micrómetros, y el de convección, puesto que toda la trayectoria del haz de iones se hace en el máximo vacío posible. Por el eje central de los discos se propone el paso de conductos de agua de refrigeración, y que tenga la finalidad de disminuir la temperatura de los receptores térmicos, a fin de mejorar la refrigeración de los discos. Como todo sistema de refrigeración por agua, se dispone de una bomba hidráulica que permite el flujo del fluido y de un intercambiador de calor que permite disminuir la temperatura de este agua mediante el uso de un condensador externo.

También se propone el empleo de un sistema de control y diagnóstico, que permita monitorizar en tiempo real la temperatura del *degradador* con objeto de evitar su degradación física por alta temperatura, así como también controlar la velocidad de giro de los discos.

### 9.3 LÁMINAS DEL DEGRADADOR

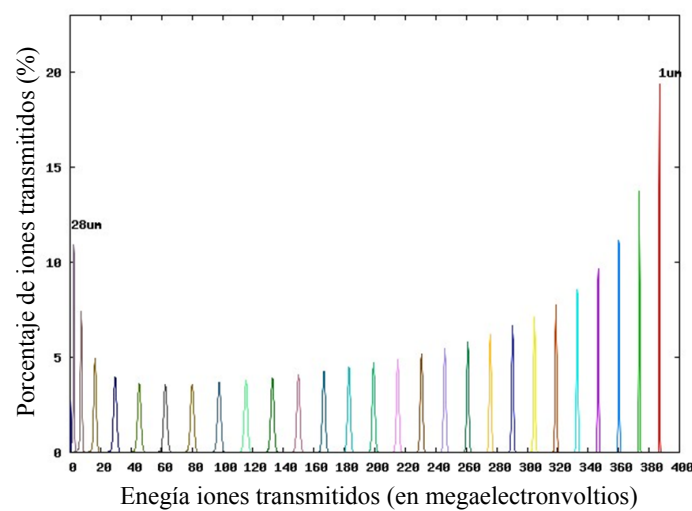
Las láminas colocada en los sistemas rotativos de los dos discos del *degradador* tienen la finalidad de disminuir, o degradar, la energía de los iones del haz de partículas. Nuestro objetivo es conseguir un haz de iones con energías comprendidas entre 0 y 400 MeV. Por lo que el haz inicial del iones de 400 MeV, en un extremo debe ser frenado casi en su totalidad, y en el otro no debe ser degradado.

Cálculos con el código *TRIM* permiten determinar que el espesor mínimo de lámina de hierro con que es frenando casi totalmente un haz de iones de hierro de 400 MeV, pero con un porcentaje de iones transmitidos superior al 95 %, es 27,73  $\mu\text{m}$ . Por lo que se propone el uso de láminas de espesores comprendidos entre espesor nulo y 28  $\mu\text{m}$ . Queda descartado el uso de una distribución continua de espesores, pues como se comenta en el apartado 9.1 (pág. 70) , queda descartada esta opción debido a la elevada complejidad de mecanizado del conjunto.

Conseguir esta distribución de espesores para un sistema formado por dos discos podría llevarse a cabo mediante la distribución de láminas siguiente. En el primero de los discos se emplearían tres láminas de 10  $\mu\text{m}$ , tres láminas de 20  $\mu\text{m}$  y tres huecos vacíos. Y en el segundo de los discos se emplearían diez láminas espesores comprendidos entre el espesor nulo y 9  $\mu\text{m}$ . El giro diferencial y sincronizado de los discos, comentado en el apartado 9.2 (pág. 76) , permite la obtención final de espesores comprendidos entre el espesor nulo y 29  $\mu\text{m}$ .

Algunos de los iones que inciden sobre las láminas del *degradador* perderán toda su energía y quedaran implantados, en especial en aquellas espesores que sean mayores. Pero cálculos realizados con el código *TRIM* determinan que los espesores 28  $\mu\text{m}$  y 29  $\mu\text{m}$  permiten la transmisión de muy bajo porcentaje de iones de hierro de 400 MeV. Sin embargo para el caso de espesores de 27  $\mu\text{m}$  este porcentaje se aproxima al 100 %. No obstante, se propone mantener estos espesores de 28  $\mu\text{m}$  y 29  $\mu\text{m}$  debido a la simplicidad geométrica propuesta, en detrimento de un mayor calentamiento del *degradador*.

Los cálculos realizados con el código *TRIM* de la figura 9-9 muestran información sobre la energía de los iones transmitidos por los diferentes espesores de láminas, así como también el porcentaje de iones transmitidos para cada uno de los casos. Debe tenerse presente que la figura muestra el porcentaje de transmitidos para cada energía puntual, y que el porcentaje total de transmitidos para uno de los espesores está representado por el área de cada una de las «campanas de Gauss» correspondientes. No obstante el autor asegura que todos ellos, excepto el correspondiente a 28  $\mu\text{m}$  son cercanos al 100 %.



**Figura 9-9:** Porcentaje de iones transmitidos por *degradador*

## 10 CONCLUSIONES

La instalación propuesta en el presente proyecto permitiría la irradiación de muestras materiales, para poder acelerar la producción del *daño primario*, característico de un reactor de fusión de primera generación, hasta en un factor 6400 veces superior.

Para ello haría uso de una haz de intensidad  $16,7 \mu\text{A}$ , de iones de hierro, de energías de hasta  $400 \text{ MeV}$ , y carga eléctrica  $+12$ , que tiene por tanto una potencia de  $563 \text{ W}$ .

Una irradiación homogénea podría entonces hacerse sobre una superficie circular de hasta  $2,25 \text{ cm}^2$  de área, alcanzándose profundidades de daño homogéneo en hierro de hasta  $27,73 \mu\text{m}$ . Con tasas de daño de hasta  $1,36 \cdot 10^{-3} \text{ dpa/s}$  o  $822 \text{ dpa/semana}$ .

Se estima un consumo eléctrico para la instalación de  $308 \text{ kW}$ , así como también un consumo de agua de refrigeración de  $21 \text{ l/s}$ .

Analizando los informes anuales de operación de la instalación japonesa *TIARA*, hemos podido estimar un valor de  $3362 \text{ horas/año}$ , para la operatividad de esta instalación. Adoptaremos un valor inferior a éste, como referencia de operatividad en nuestra instalación. Concretamente  $3000 \text{ horas/año}$ .



## 11 BIBLIOGRAFÍA

### 11.1 TEXTOS LEGISLATIVOS

- [1] Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales. (BOE nº 269, de 10 de noviembre de 1995). Citado en la página 16.
- [2] R. D. 783/2001, de 6 de julio, por el que se aprueba el Reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes. (BOE nº 178, de 26 de julio de 2001). Citado en la página 16.
- [3] R. D. 614/2001, de 8 de junio, sobre disposiciones mínimas para la protección de la salud y seguridad de los trabajadores frente al riesgo eléctrico. (BOE nº 148, de 21 de junio de 2001). Citado en la página 16.
- [4] R. D. 1066/2001, de 28 de septiembre, por el que se aprueba el Reglamento que establece condiciones de protección del dominio público radioeléctrico, restricciones a las emisiones radioeléctricas y medidas de protección sanitaria frente a emisiones radioeléctricas. (BOE nº 234, de 29 de septiembre de 2001). Citado en la página 16.
- [5] R. D. 1215/1997, de 18 de julio, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud para la utilización por los trabajadores de los equipos de trabajo. (BOE nº 188, de 7 de agosto de 1997). Citado en la página 16.
- [6] R. D. 2060/2008, de 12 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de equipos a presión y sus instrucciones técnicas complementarias. (BOE nº 31, de 5 de febrero de 2009). Citado en la página 16.
- [7] R. D. 1836/1999, de 3 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento sobre instalaciones nucleares y radiactivas. (BOE nº 313, de 31 de diciembre de 1999). Citado en las páginas 16 y 30.
- [8] R. D. 35/2008, de 18 de enero, por el que se modifica el Reglamento sobre instalaciones nucleares y radiactivas, aprobado por Real Decreto 1836/1999, de 3 de diciembre. (BOE nº 42, de 18 de febrero de 2008). Citado en las páginas 16 y 30.
- [9] R. D. 1317/1989, de 27 de octubre, por el que se establece el Sistema Legal de Unidades de Medida. (BOE nº 264, de 3 de noviembre de 1989). Citado en las páginas 98, 109, 190 y 212.

### 11.2 NORMAS Y PATENTES

- [10] ASTM E 521:1996 Standard practice for neutron radiation damage simulation by charged-particle irradiation. Citado en las páginas 17, 39, 150 y 158.
- [11] ASTM E 821:1996 Standard practice for measurement of mechanical properties during charged-particle irradiation. Citado en la página 17.
- [12] ASTM A 1008/A 1008M:2004 Standard specification for steel, sheet, cold-rolled, carbon, structural, high-

strength low-alloy and high strength low-alloy with improved formability. Citado en las páginas 53 y 217.

- [13] LAWRENCE, E. O. *Method and apparatus for the acceleration of ions*. United States Patent and Trademark Office, nº 1 948 384. Febrero de 1934. Citado en la página 181.
- [14] HAROLD, H. *Isochronous cyclotron*. United States Patent and Trademark Office, nº 4 197 510. Abril de 1980. Citado en la página 193.
- [15] YVES, J. *Cyclotron*. United States Patent and Trademark Office, nº 4 771 208. Septiembre de 1988. Citado en la página 193.
- [16] YOSHIO, A. *Stripping Foil*. United States Patent and Trademark Office, nº 7 223 463 B2. Mayo de 2007. Citado en la página 198.

### 11.3 LIBROS

- [17] ALARCÓN, J. M.; M. ALBALADEJO (2004): Ciclo de histéresis. Universidad de Murcia, Murcia. Citado en la página 56.
- [18] FEYNMAN, R.; LEIGHTON, R.; SANDS, M. (1998): Física Feynman volumen II, Electromagnetismo y Materia. Addison Wesley Longman de México S.A., Naucalpan de Juárez. Citado en la página 103.
- [19] ZIEGLER, J. F.; BIRSACK, J. P.; ZIEGLER, M. D. (2008): The Stopping and Range of Ions in Matter. SRIM Co., Maryland. Citado en las páginas 126, 128, 136, 140, 141, 142 y 146.
- [20] ALONSO, F. J. (1989): Proyecto fin de carrera: daño en materiales estructurales candidatos para un reactor comercial de fusión. E.T.S.I. Industriales, Madrid. Citado en la página 133.
- [21] BURCHAM, W. E. (1973): Nuclear physics; an introduction. Longman Group Limited, London. Citado en la página 192.
- [22] FRENCH, A. P. (1968): Special relativity. W. W. Norton & Company, New York. Citado en la página 211.

### 11.4 ARTÍCULOS DE REVISTAS Y PUBLICACIONES

- [23] Toschi, R. (1997): "Nuclear fusion, an energy source." en Fusion Engineering and Design vol. 36, nº 1-8 (abril) pp. 1-8. Citado en la página 5.
- [24] MÖSLANG, A. (2008): "IFMIF: the intense neutron source to qualify materials for fusion reactors" en Comptes Rendus Physique vol. 9 nº 3-4 (abril-mayo) pp. 457-468. Citado en la página 11.
- [25] MÖSLANG, T. *et al* (1998): "Conceptual design of the international fusion materials irradiation facility (IFMIF)" en Journal of Nuclear Materials vols. 258-263 nº 1 (octubre) pp. 106-112. Citado en la página 11.
- [26] KLEY, W.; BISHOP, G.; SINHA, A. (1988): "Limitations of 14 MeV neutron simulation techniques" en Journal of Nuclear Materials vols. 155-157 nº 2 (julio) pp. 1320-1324. Citado en la página 11.
- [27] LOGAN, C. M.; ANDERSON, J. D.; MUKHERJEE, A. K. (1973): "Proton simulation of displacement effects induced in metals by 14 MeV neutrons." en Journal of Nuclear Materials vol. 48 nº 3 (octubre) pp. 223-232. Citado en las páginas 13 y 107.
- [28] MAZEY, D. J. (1990): "Fundamental aspects of high-energy ion-beam simulation techniques and their re-

- levance to fusion materials studies." en Journal of Nuclear Materials vol. 174 n° 2-3 (noviembre) pp. 196-209. Citado en la página 13.
- [29] SMITH, H. V.; LOTT, R. G. (1977): "A high temperature, ultra high vacuum facility for heavy ion simulation of neutron radiation damage to potential reactor materials." en Nuclear Instruments and Methods vol. 143 n° 1 (mayo) pp. 125-132. Citado en la página 14.
- [30] SERRUYS, Y. *et al* (2008): "JANNUS: experimental validation at the scale of atomic modelling." en Comptes Rendus Physique vol. 9 n° 3-4 (abril-mayo) pp. 437-444. Citado en las páginas 19, 171 y 172.
- [31] ISEKI, M. *et al* (1996): "Recoil energy spectrum effect in vanadium by electron and light -and heavy- ion irradiation." en Journal of Nuclear Materials vol. 233-237 n° 1 (octubre) pp. 492-496. Citado en la página 19.
- [32] BREEGER, E. W. *et al* (2001): "Two-beam irradiation chamber for in situ ion-implantation and RBS at temperatures from 15 K to 300 K." en Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B vol. 174 n° 1-2 (marzo) pp. 199-204. Citado en la página 19.
- [33] KOHYAMA, A. *et al* (2000): "A new multiple bemas-material interaction research facility for radiation damage studies in fusion materials." en Fusion Engineering and Design vol. 51-52 (noviembre) pp. 789-795. Citado en la página 19.
- [34] FUKUDA, M. *et al* (2003): "An energy spread minimization system for microbeam generation in the JAERI AVF cyclotron." en Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B vol. 210 (septiembre) pp. 33-36. Citado en la página 19.
- [35] SERRUYS, Y. *et al* (2005): "Multiple ion beam irradiation and implantation: JANNUS project." en Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B vol. 240 n° 1-2 (octubre) pp. 124-127. Citado en la página 19.
- [36] TSUCHIDA, H. TAKAHASHI, H. (1996): "In situ observation of austenitic stainless steels during dual-beam irradiation." en Journal of Nuclear Materials vol. 239 (diciembre) pp. 112-117. Citado en la página 19.
- [37] FARRELL, K.; LEWIS, M. B.; PACKAN, N. H. (1978): "Simultaneous bombardment with helium, hydrogen, and heavy ions to simulate microstructural damage from fission or fusion neutrons." en Scripta Metallurgica vol. 12, n° 12 (diciembre) pp. 1121-1124. Citado en las páginas 21 y 34.
- [38] WAS, G. S. *et al* (2002): "Emulation of neutron irradiation effects with protons: validation of principle." en Journal of Nuclear Materials vol. 300, n° 2-3 (febrero) pp. 198-216. Citado en la página 13.
- [39] ABROMEIT, C. (1994): "Aspects of simulation of neutron damage by ion irradiation." en Journal of Nuclear Materials vol. 216 (octubre) pp. 78-96. Citado en la página 13.
- [40] MARZEY, D. J. (1990): "Fundamental aspects of high-energy ion-beam simulation techniques and their relevance to fusion materials studies." en Journal of Nuclear Materials vol. 174, n° 2-3 (noviembre) pp. 196-209. Citado en la página 13.
- [41] VERNON, H. ; LOTT, R. G. (1977): "A high temperature, ultra high vacuum facility for heavy ion simulation of neutron radiation damage to potential reactor materials." en Nuclear Instruments and Methods vol. 143, n° 1 (mayo) pp. 125-132. Citado en la página 13.
- [42] TROCELLIER, P. *et al* (2008): "Application of multi-irradiation facilities." en Nuclear Instruments and

- Methods in Physics Research B vol. 266, n° 12-13 (junio) pp. 3178-3181. Citado en las páginas 171 y 172.
- [43] KOIVISTO, H. *et al* (2001): "The first results with the new JYFL 14 GHz ECR ion source." en Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B vol. 174, n° 3 (abril) pp. 379-384. Citado en la página 46.
- [44] HIRASAWA, T. *et al* (2004): "Effect of ferrocene addition on sooting limits in laminar premixed ethylene-oxygen-argon flames." en Combustion and Flame vol. 139, n° 4 (diciembre) pp. 288-299. Citado en la página 49.
- [45] TAMBURELLA, C.; GILES T. J. (2008): "Beam diagnostics for an 18 MeV medical cyclotron." en Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B vol. 266, n° 19-20 (octubre) pp. 4678-4681. Citado en la página 54.
- [46] HAMADA, S. *et al* (1998): "Development of a triple beam irradiation facility." en Journal of Nuclear Materials vol. 258-263, n° 1 (octubre) pp. 383-387. Citado en la página 67.
- [47] TERRIEN, J. (1975): "News from the Bureau International des Poids et Mesures" en Metrologia n° 11 (octubre) pp. 179-183. Citado en las páginas 190 y 212.
- [48] BETHE, H. A. (1939): "Energy production in stars" en Physical Review vol. 55, n° 5 (marzo) pp. 434-456. Citado en la página 96.
- [49] RIBE, F. L. (1975): "Fusion reactor systems" en Reviews of Modern Physics vol. 47, n° 1 (enero) pp. 7-41. Citado en la página 96.
- [50] THOMPSON, W. B. (1957): "Thermonuclear reactions rates" en Proceedings of the Physical Society. Section B vol. 70, n° 1 (enero) pp. 1-6. Citado en la página 96.
- [51] KHRIPUNOV, B. I. *et al* (2009): "Evidence of radiation damage impact on material erosion in plasma environment" en Journal of Nuclear Materials vols. 390-391 (junio) pp. 921-924. Citado en la página 97.
- [52] KULCINSKI, G. L. *et al* (1974): "Radiation damage limitations in the design of the Wisconsin Tokamak Fusion Reactor design" en Nuclear Technology vol. 22 (abril) pp. 20-35. Citado en la página 97.
- [53] MAISONNIER, D. (2008): "European DEMO design and maintenance strategy" en Fusion Engineering and Design vol. 83 (diciembre) pp. 858-864. Citado en las páginas 97 y 98.
- [54] SIMAKOV, S. P. *et al* (2009): "Comparative study of survived displacement damage defects in iron irradiated in IFMIF and fusion power reactors." en Journal of Nuclear Materials vols. 386-388 (abril) pp. 52-55. Citado en las páginas 20, 98, 99, 148, 149, 150 y 151.
- [55] B. M. S. (1979): "High-flux neutron source for fusion studies" en Physics Today vol. 32 (abril) pp. 19-20. Citado en las páginas 11 y 99.
- [56] QIU, L. J. *et al* (1995): "A small tokamak conceptual design for volumetric neutron source" en Fusion Engineering and Design vol. 27 (marzo) pp. 247-252. Citado en las páginas 99 y 100.
- [57] ÜBEYLI, M. (2006): "On the radiation damage characterization of candidate first wall materials in a fusion reactor using various molten salts." en Journal of Nuclear Materials vol. 359 (diciembre) pp. 192-201. Citado en la página 100.
- [58] LÄSSER, R. *et al* (2007): "Structural materials for DEMO: The EU development, strategy, testing and modelling." en Fusion Engineering and Design vol. 82 (octubre) pp. 511-520. Citado en las páginas 9, 100

y 101.

- [59] ANDREANI, R. *et al* (2004): "The European integrated materials and technology programme in fusion." en Journal of Nuclear Materials vols. 329-333 (agosto) pp. 20-30. Citado en la página 102.
- [60] LINDAU, R. *et al* (2005): "Present development status of EUROFER and ODS-EUROFER for application in blanket concepts." en Fusion Engineering and Designs vols. 75-79 (noviembre) pp. 989-996. Citado en la página 102.
- [61] SIMAKOV, S. P. *et al* (2005): "Neutronics and activation characteristics of the international fusion material irradiation facility." en Fusion Engineering and Designs vols. 75-79 (noviembre) pp. 813-817. Citado en la página 102.
- [62] FISCHER, U.; SIMAKOV, S. P.; WILSON, P. H. (2004): "Transmutation behaviour of Eurofer under irradiation in the IFMIF test facility and fusion power reactors." en Journal of Nuclear Materials vols. 329-333 (agosto) pp. 228-232. Citado en las páginas 111 y 112.
- [63] GEISSEL, H. *et al* (2002): "Experimental studies of heavy-ion slowing down in matter." en Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B vol. 195 (octubre) pp. 3-54. Citado en las páginas 111 y 175.
- [64] RUTHERFORD, E. (1911): "The scattering of  $\alpha$  and  $\beta$  particles by matter and the structure of the atom." en Philosophical Magazine Series 6 vol. 21, n° 125 (mayo) pp. 669-688. Citado en la página 124.
- [65] BOHR, N. (1948): "The penetration of atomic particles through matter." en Mathematisk-Fysiske Meddelelser vol. 18, n° 8 (diciembre) pp. 1-144. Citado en las páginas 127, 142 y 157.
- [66] SOMMERFELD, A. (1932): "Asymptotische integration der differentialgleichung des Thomas-Fermischen atoms." en Zeitschrift für Physik vol. 78 (mayo) pp. 283-308. Citado en la página 127.
- [67] MOLIERE, G. (1947): "Therorie der Streuung schneller geladener Teilchen I. Einzelstreuung am abgeschirmten Coulomb-Feld." en Zeitschrift für Naturforschung vol. A2 pp. 133-145. Citado en la página 128.
- [68] LENZ, W. (1932): "Über die anwendbarkeit der statistischen methode auf ionengitter." en Zeitschrift für Physik vol. 77, n° 11-12 (noviembre) pp. 713-721. Citado en la página 128.
- [69] JENSEN, H. (1932): "Die Ladungsverteilung in Ionen und die Gitterkonstante des Rubidumbromids nach der statistischen Methode ." en Zeitschrift für Physik vol. 77, n° 11-12 (noviembre) pp. 722-745. Citado en la página 128.
- [70] ROBINSON, M. T. (1994): "Basic physics of radiation damage production." en Journal of Nuclear Materials vol. 216 (octubre) pp. 1-28. Citado en las páginas 130, 131, 135 y 148.
- [71] MANSUR, L. K. (1994): "Theory and experimental background on dimensional changes in irradiated alloys." en Journal of Nuclear Materials vol. 216 (octubre) pp. 97-123. Citado en la página 134.
- [72] SIGMUND, P. (1969): "Theory of sputtering. I. Sputtering yield of amorphous and polycrystalline targets." en Physical Review vol. 184, n° 2 (agosto) pp. 383-416. Citado en la página 134.
- [73] SCHOU, J. (1980): "Transport theory for kinetic emission of secondary electrons from solids." en Physical Review B vol. 22, n° 5 (septiembre) pp. 2141-2174. Citado en la página 134.
- [74] KINCHIN, G. H.; PEASE, R. S. (1955): "The displacement of atoms in solids by radiation ." en Reports on Progress in Physics vol. 18, n° 1 (enero) pp. 1-51. Citado en la página 136.

- [75] SIGMUND, P. (1969): "On the number of atoms displaced by implanted ions or energetic recoil atoms." en Applied Physics Letters vol. 14, nº 3 (febrero) pp. 114-117. Citado en la página 137.
- [76] ROBINSON, M. T. (1965): "The energy spectra of atoms slowing down in structureless media." en Philosophical Magazine vol. 12, nº 115 (julio) pp. 145-156. Citado en la página 137.
- [77] NORGETT, M. J.; ROBINSON, M. T.; TORRENS, I. M. (1975): "A proposed method of calculating displacement dose rates." en Nuclear Engineering and Design vol. 33, nº 1 (agosto) pp. 50-54. Citado en la página 139.
- [78] HARRISON, D. E.; GRAY, W. L.; EFFRON, H. M. (1969): "Algorithm for the calculation of the classical equations of motion of an N-body system." en Journal of Mathematical Physics vol. 10, nº 7 (julio) pp. 1179-1184. Citado en la página 143.
- [79] WILSON, W. D.; HAGGMARK, L. G.; BIRSACK, J. P. (1977): "Calculations of nuclear stopping, ranges, and straggling in the low-energy region." en Journal of Mathematical Physics vol. 15, nº 5 (marzo) pp. 2458-2468. Citado en la página 143.
- [80] BIRSACK, J. P.; HAGGMARK, L. G. (1980): "A Monte Carlo computer program for the transport of energetic ions in amorphous targets." en Nuclear Instruments and Methods vol. 174, nº 1-2 (agosto) pp. 257-269. Citado en la página 143.
- [81] O'CONNER, D. J.; BIRSACK, J. P. (1986): "Comparison of theoretical and empirical interatomic potentials." en Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B vol. 15, nº 1-6 (abril) pp. 14-19. Citado en la página 144.
- [82] OEN, O. S.; ROBINSON, M. T. (1976): "Computer studies of the reflection of light ions from solids." en Nuclear Instruments and Methods vol. 132 (enero) pp. 647-653. Citado en la página 147.
- [83] MÖSLANG, A.; VLADIMIROV, P. (2002): "Neutronics calculations and design for the medium flux test module of IFMIF." en Fusion Engineering and Design vols. 63-64 (diciembre) pp. 121-126. Citado en la página 148.
- [84] Ryazanov, A. I. *et al* (2009): "Modeling of cascade and sub-cascade formation at high PKA energies in irradiated fusion structural materials" en Journal of Nuclear Materials vol. 386-388 (abril) pp. 132-134. Citado en las páginas 149 y 150.
- [85] SIGMUND, P. (1969): "A note on integral equations of the Kinchin-Pease type." en Radiation Effects and Defects in Solids vol. 1, nº 1 pp. 15-18. Citado en la página 149.
- [86] NORDLUND, K. *et al* (2006): "Molecular dynamics simulations of threshold displacement energies in Fe." en Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B vol. 246, nº 2 (mayo) pp. 322-332. Citado en la página 150.
- [87] BROEDERS, C. H. M.; A. Y. KONOBEYEV (2004): "Defect production efficiency in metals under neutron irradiation." en Journal of Nuclear Materials vol. 328, nº 2-3 (julio) pp. 197-214. Citado en la página 151.
- [88] VLADIMIROV, P.; MÖSLANG, A. (2004): "Comparison of material irradiation conditions for fusion, spallation, stripping and fission neutron sources." en Journal of Nuclear Materials vols. 329-333, nº 3-4 (abril-mayo) pp. 233-237. Citado en las páginas 20, 22, 152 y 153.

- [89] WIEDERSICH, H. (1991): "Effects of the primary recoil spectrum on microstructural evolution metals under neutron irradiation." en Journal of Nuclear Materials vols. 179-181, n° 2-3 (marzo-abril) pp. 70-75. Citado en la página 152.
- [90] LEICHTLE, D.; FISCHER, U. (2000): "Qualification of irradiation effects on ceramic breeder materials in fusion and fission systems." en Fusion Engineering and Design vols. 51-52 (noviembre) pp. 1-10. Citado en la página 152.
- [91] OYAMA, Y.; YAMAGUCHI, S.; KONNO, C. (1989): "An intense DT neutron source and test conditions for fusion nuclear technology research." en Fusion Engineering and Design vol. 10 pp. 103-107. Citado en la página 155.
- [92] TOMABECHI, K. (1989): "International thermonuclear experimental reactor, ITER." en Fusion Engineering and Design vol. 8 pp. 43-49. Citado en la página 155.
- [93] EHRLICH, K.; MÖSLANG, A. (1998): "IFMIF - An international fusion materials irradiation facility." en Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B vol. 139 (abril) pp. 72-81. Citado en la página 156.
- [94] GARIN, P.; SUGIMOTO, M. (2008): "Status of IFMIF design and R&D." en Fusion Engineering and Design vol. 83, n° 7-9 (diciembre) pp. 971-975. Citado en la página 156.
- [95] VOOK, F. L. *et al* (1975): "Report to the American Physical Society by the study group on physics problems relating to energy technologies: Radiation effects on materials." en Reviews of Modern physics vol. 47, n° 3 (julio) pp. 1-45. Citado en las páginas 162, 163, 171 y 172.
- [96] LAWRENCE, E. O.; LIVINGSTON, M. S. (1932): "The production of high speed light ions without the use of high voltages." en Physical Review vol. 40, n° 1 (abril) pp. 19-35. Citado en la página 181.
- [97] STRIJCKMANS, K. (2001): "The isochronous cyclotron: principles and recent developments." en Computerized Medical Imaging and Graphics vol. 25, n° 2 (marzo) pp. 69-78. Citado en las páginas 194 y 197.
- [98] CHOU, W.; KOSTIN, M.; TANG, Z. (2008): "Stripping efficiency and lifetime of carbon foils." en Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A vol. 590, n° 1-3 (junio) pp. 1-12. Citado en la página 198.
- [99] ZSCHORNACK, G. *et al* (2008): "Compact electron beam ion sources/traps: review and prospects." en Review of Scientific Instruments vol. 79, n° 2 02A703 (febrero). Citado en la página 200.
- [100] GELLER, R.; JACQUOT, B.; PONTONNIER, M. (1985): "Status of the multiply charged heavy-ion source MINIMAFIOS." en Review of Scientific Instruments vol. 56, n° 8 (agosto) pp. 1505-1510. Citado en las páginas 201 y 202.
- [101] GELLER, R. (1970): "New high intensity ion source with very low extraction voltage." en Applied Physics Letters vol. 16 (mayo) pp. 401. Citado en la página 202.
- [102] GELLER, R.; LUDWIG, P.; MELIN, G. (1992): "Metal ion production in ECRIS." en Review of Scientific Instruments vol. 63, n° 4 (abril) pp. 2795-2800. Citado en las páginas 203 y 204.
- [103] JOVOVIC, J. *et al* (2007): "MIVOC method at the mVINIS ion source." en Nuclear Technology & Radiation Protection vol. XXII, n° 2 (diciembre) pp. 10-14. Citado en la página 204.
- [104] KOIVISTO, H.; ÄRJE, J.; NURMIA, M. (1994): "Metal ion beams from an ECR ion source using vo-

- lative compounds.” en Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B vol. 94, nº 3 (noviembre) pp. 291-296. Citado en la página 204.
- [105] WALDMANN, H.; MARTIN, B. (1995): “Highly charged metal ion beams produced from organometallic compounds.” en Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B vol. 98, nº 1-4 (mayo) pp. 532-535. Citado en la página 205.
- [106] STIEBING, K. *et al* (1999): “Highly charged metal ions by placing a ferrocene container inside the ECR ion source.” en Physica Scripta vol. T80 (noviembre) pp. 509-510. Citado en la página 205.
- [107] JOHO, W. (1986): “Modern trends in cyclotrons.” en CERN Accelerator School - Accelerator Physics vols. 15-26 (septiembre) pp. 260-290. Citado en las páginas 53 y 216.
- [108] ZAREMBA, S. (2005): “Magnets for cyclotrons.” en CERN Accelerator School - Specialised Course on Small Accelerators (junio) pp. 253-270. Citado en la página 217.
- [109] ZHANG, T. *et al* (2007): “Magnet design and construction preparation for CYCIAE-100 at CIAE.” en Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B vol. 261, nº 1-2 (agosto) pp. 25-30. Citado en la página 217.

## 11.5 DOCUMENTOS ELECTRÓNICOS

- [110] UNITED NATIONS (en línea). Draft decision-/CP.15 “Copenhagen accord”. Framework Convention on Climate Change. Consulta realizada el 02 de enero de 2010. <http://unfccc.int> Citado en la página 3.
- [111] IEA (en línea). 2009 “Key world energy statistics”. International Energy Agency. Consulta realizada el 02 de enero de 2010. <http://www.iea.org> Citado en las páginas 3 y 4.
- [112] BP (en línea). Junio de 2009 “Statistical review of world energy”. The British Petroleum Company. Consulta realizada el 02 de enero de 2010. <http://www.bp.com/statisticalreview> Citado en las páginas 3 y 4.
- [113] MOREIRA, R. (en línea). XIV Seminario de Ingeniería Biomédica 2004 “Principios y elementos de un ciclotrón”. Facultades de Medicina e Ingeniería - Universidad de la República Oriental de Uruguay. Uruguay. Consulta realizada el 29 de diciembre de 2009. <http://www.nib.fmed.edu.uy> Citado en la página 192.
- [114] ZSCHORNACK, G. *et al* (en línea). “Dresden electron beam ion sources: latest developments”. Dreebit. Germany. Consulta realizada el 15 de diciembre de 2009. <http://www.dreebit.com> Citado en la página 200.

## 11.6 BIBLIOGRAFÍA GENERAL

- AVERBACK, R. S.; DÍAZ DE LA RUBIA, T. (1998): “Displacement damage in irradiated metals and semiconductors.” en Solid State Physics vol. 51, pp. 282-402.
- HERNÁNDEZ MANGAS, J. M. (2000): Tesis doctoral: simulación de la implantación iónica en semiconductores. Universidad de Valladolid, Valladolid.
- LINDHARD, J.; NIELSEN, V.; SCHARFF, M. (1968): “Approximation method in classical scattering by screened coulomb fields.” en Mathematisk-Fysiske Meddelelser vol. 36, nº 10 (marzo) pp. 1-32.



*EMULACIÓN DEL DAÑO POR RADIACIÓN DE REACTOR DE  
FUSIÓN NUCLEAR*

DOCUMENTO 2: **ESTUDIO ECONÓMICO**

# 1 INVERSIÓN INICIAL

## 1.1 COSTES EQUIPOS NO COMERCIALIZADOS

En este apartado procederemos a la estimación «grosera» de los costes de fabricación de aquellos equipos, que por sus características o funciones, no son actualmente comercializados por ninguna empresa. Nos estamos refiriendo a nuestro ciclotrón y al degradador.

En el caso del ciclotrón, son dos los principales montantes que justifican su elevado coste de fabricación, a saber, el coste de las **308 t** de material magnético (acero ASTM-A 1008 de espesor 0,61 mm), y el coste de las **2,6 t** de material de bobina (cobre bobinado e impregnado). El precio unitario del material magnético, suministrado por la empresa *Copper & Brass*, es de **9685 EUR/t**, y para el caso del material de bobina, **25 000 EUR/t**, según la empresa de ingeniería *Elytt Energy*. Por tanto, los costes son **2984 kEUR** y **66 kEUR**.

En la tabla 1-1 se recoge una estimación de costes de los principales elementos del *ciclotrón*, siendo algunos de ellos suministrados por *Elytt Energy*, pero han sido cotejados de forma satisfactoria, en cuanto a orden de magnitud, con los suministrados por un estudio de costes de ciclotrón realizado por la empresa *Jupiter Corp.* para el *U. S. Department of Energy*. Igualmente se aplica un coste adicional sobre el 50 % del total, en concepto de costes de diseño y otros, pues se trata de un equipo de nuevo diseño de alta tecnología.

En cuanto a los costes de fabricación del *degradador*, su principal montante es el relativo a las delgadas láminas de hierro, que concretamente son quince, a saber, una de 1  $\mu\text{m}$ , una de 2  $\mu\text{m}$ , una de 3  $\mu\text{m}$ , una de 4  $\mu\text{m}$ , una de 5  $\mu\text{m}$ , una de 6  $\mu\text{m}$ , una de 7  $\mu\text{m}$ , una de 8  $\mu\text{m}$ , una de 9  $\mu\text{m}$ , tres de 10  $\mu\text{m}$  y tres de 20  $\mu\text{m}$ . En la tabla 1-2 están recogidos los precios de láminas de hierro de pureza 99,85 % cada una, de dimensiones 50 mm  $\times$  50 mm, comercializados por la empresa *Goodfellow*. Por lo tanto, el coste total de las láminas del *degradador* sería 5226 EUR, por lo que estimaremos su coste total en **6 kEUR**.

**Tabla 1-1:** Costes de fabricación del *ciclotrón*

valores kiloeuros	
Elemento	Coste
Material magnético	2984
Material de bobina	66
Sistema radio frecuencia	100
Sistema de vacío	160
Sistema de inyección	200
Sistema de extracción	150
Subtotal	3660
Costes diseño (50 %)	1830
<b>TOTAL</b>	<b>5490</b>

*Algunos datos suministrados por Elytt Energy*

**Tabla 1-2:** Precios de las láminas de espesores usados en el *degradador*

Espesor, en micrómetros	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	20
Precio, en euros	473	450	404	382	361	340	337	334	318	314	295

*Datos suministrados por la empresa Goodfellow*

## 1.2 COSTE DE EQUIPOS

Tomaremos la inversión inicial, como la relativa a la adquisición de los diferentes equipos que componen la instalación. Una relación de éstos viene recogida en la tabla 1-3, así como de las fuentes de las que han sido tomados.

**Tabla 1-3:** Inversión inicial estimada para la instalación

valores kiloeuros		
Equipo	Coste	Fuente
Fuentes de iones	800	<i>Pantechnik<sup>TM</sup></i>
Ciclotrón	5490	apartado 1.1
Dipolo	29	<i>GMW<sup>TM</sup></i>
Cuadрупolos	2×5,5	<i>Radiabeam Tech.<sup>TM</sup></i>
Degradador	6,0	apartado 1.1
Faraday cup	1,3	<i>Dreebit<sup>TM</sup></i>
Medidor de emitancia	23,9	<i>Dreebit<sup>TM</sup></i>
<b>TOTAL</b>	<b>6361,2</b>	

*Datos tomados de diferentes fuentes*

## 2 COSTES ANUALES

Como costes anuales tendremos en cuenta la electricidad, el agua y la *fente primaria de partículas*, que para nuestro caso es el *ferroceno*.

En el caso de la electricidad, nuestra instalación consume energía eléctrica a una potencia de **308 kW**, y puesto que hemos supuesto una disponibilidad de 3000 horas/año de la planta, el consumo de energía eléctrica total será de **924 000 kWh** cada año. Debido a la potencia instalada, lo recomendable sería acogerse a la tarifa 3.1 del sistema eléctrico español, y comprar entonces en el mercado eléctrico. Pero con objeto de realizar una estimación «grosera» (pues este proceder se ha realizado en otras estimaciones de costes), tomaremos los valores correspondientes a la tarifa fija de usuario doméstico, que en enero de 2010 se situaba en 1,702 005 EUR/kW·mes para el término de potencia, y en 0,116 566 EUR/kWh para el término de consumo de energía. Por lo que coste anual por el servicio de electricidad sería aproximadamente de **114 kEUR**.

No tendremos en cuenta el coste del suministro de agua, pues supuestamente el agua de refrigeración debería funcionar en circuito cerrado.

En cuanto al coste del *ferroceno*, la empresa *Spectrum Chemicals Corp.* suministra 25 g de esta sustancia al precio de 32,15 EUR. Puesto que los requerimientos anuales de *ferroceno* en nuestra instalación son de 0,1 g, despreciaremos este coste con respecto a los demás.

Podemos asumir entonces que los costes anuales de instalación corresponden principalmente al consumo de energía eléctrica, que ascienden aproximadamente a una cifra anual de **114 kEUR**.

*EMULACIÓN DEL DAÑO POR RADIACIÓN DE REACTOR DE  
FUSIÓN NUCLEAR*

DOCUMENTO 3: **ANEXOS**

ANEXO A

**ESTUDIO DE DAÑO MATERIAL POR RADIACIÓN**

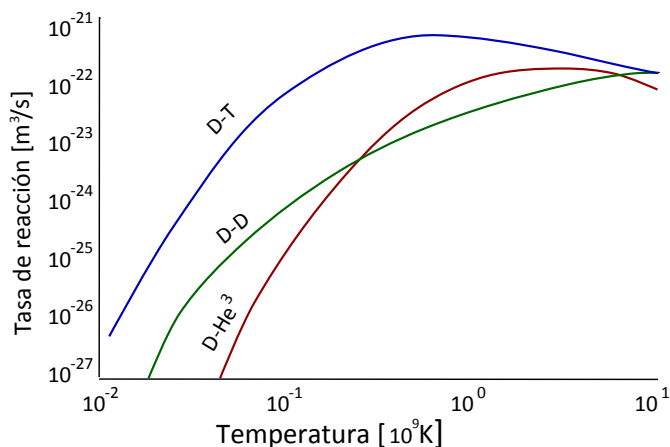
## A.1 RADIACIÓN EN REACTOR DE FUSIÓN

Hans Albrecht Bethe, fue el primero en describir cuantitativamente las reacciones de fusión nuclear, en el año 1939, al identificar los procesos de producción de energía de las estrellas con los procesos conocidos como de nucleosíntesis estelar [48]. Motivo por el cual, de entre todas las reacciones de fusión que propuso, no se encontraba la de fusión del deuterio con el tritio, al no producirse ésta en la estrellas. No fue hasta el año 1957, cuando W. B. Thompson descubrió algunas reacciones de fusión de origen no estelar, experimentando con gases en equilibrio térmico [50]. Entre estas reacciones, si se encontraba la de fusión del deuterio con el tritio, ecuación A-1. Adicionalmente, con estos experimentos, Thompson pudo comprobar que la probabilidad de algunas reacciones de fusión eran función de la temperatura.



Hoy día, la reacción de fusión deuterio-tritio es de gran importancia desde el punto de vista tecnológico, pues es la candidata a ser utilizada en los futuros reactores de fusión de primera generación [49]. A pesar de ser la reacción de fusión que mayor daño por radiación produce en las paredes de un reactor, y ser uno de sus reactivos, el tritio, difícil de obtener en la naturaleza, se puede observar en la figura A.1-1, que es la reacción que menor temperatura de funcionamiento requiere, además de ser también, la que mayor probabilidad de ocurrencia tiene. El que esa temperatura de mínimo funcionamiento sea del orden de 100 000 000 K (diez veces la temperatura del núcleo del sol), para la tecnología actual constituye un parámetro decisivo para seleccionar la reacción deuterio-tritio, relegando otras reacciones como las de deuterio-deuterio y deuterio-helio 3, a la construcción de posibles reactores de fusión de segunda generación.

Como puede deducirse de la ecuación A-1, el daño que pueden sufrir los materiales expuestos directamente al plasma (*primera pared*), es debido a tres fenómenos, a saber, 1) la



Propiedad de Dstrozzi, bajo licencia Creative Commons Reconocimiento 2.5. Modificada con permiso por Jesús P. de Vicente.

**Figura A.1-1:** Sección eficaz de reacción en forma de tasa de reacción para distintas reacciones de fusión, en función de la temperatura. Datos obtenidos con NSL Plasma Formulary.

erosión debida al movimiento del plasma de deuterio y tritio [51], 2) la implantación de átomos de helio, y 3) la radiación de neutrones muy energéticos [52]. Será el tercero de ellos, la radiación neutrónica, el que mayor daño produzca en los materiales de la *primera pared*, así como también el único en trasladar su efecto más allá de dicha pared (debido a la carga nula de los neutrones los hace muy penetrantes). No obstante, este no será el motivo por el que centrar nuestra atención en la radiación neutrónica, sino por ser objeto del presente proyecto.

### A.1.1 RADIACIÓN NEUTRÓNICA

Son varias las propuestas europeas, para el diseño conceptual del primer prototipo de central eléctrica de fusión, DEMO [53]. Una relación de la potencia de fusión (no térmica), de la potencia eléctrica, del rendimiento de la planta y de la carga neutrónica de estas propuestas, viene recogida en la tabla A.1-1 para estas propuestas.

*Nota: En la tabla A.1-1, el rendimiento se ha calculado como la relación de la potencia eléctrica con la potencia de fusión, y no con la potencia térmica. Y por tanto, rendimientos del 60 % del modelo D (muy superior al convencional para una central térmica) no indican una temperatura sorprendentemente elevada del vapor a «turbinar», ni una violación del*



**Tabla A.1-1:** Parámetros generales de las propuestas europeas para diseño conceptual de DEMO.

Parámetros	Modelo A	Modelo AB	Modelo B	Modelo C	Modelo D
Potencia de fusión, en <i>megavatios</i>	5000	4290	3600	3410	2530
Potencia eléctrica, en <i>megavatios</i>	1546	1500	1332	1449	1527
Rendimiento, en <i>tanto por cien</i>	31	35	36	42	60
Carga neutrónica, en <i>megavatios por metro cuadrado</i>	2,2	1,8	2,0	2,2	2,4

*Datos tomados de la revista Fusion engineering and design [53].*

segundo principio de la termodinámica, sino que son debidos a una generación interna de calor por la reacción nuclear exotérmica de producción de tritio.

Un espectro neutrónico típico de un reactor de primera generación, podría ser el calculado por S. P. Simakov [54], al cual hemos eliminado su dependencia por unidad de energía para representarlo como en la figura A.1-2. En este espectro, que corresponde a un reactor de 3400 MW de fusión, puede apreciarse un pico para los neutrones de 14 MeV, diez órdenes de magnitud superior a la media. Es cierto que según la ecuación A-1, todo el espectro neutrónico debiera corresponder a 14 MeV, pero la difusión del espectro es debida a la presencia de un medio material (el plasma) y a los choques entre los neutrones. Integrado la curva de esta figura tenemos el *flujo neutrónico total*, de valor  $11,4 \cdot 10^{14} \frac{\text{neutrones}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}$ .

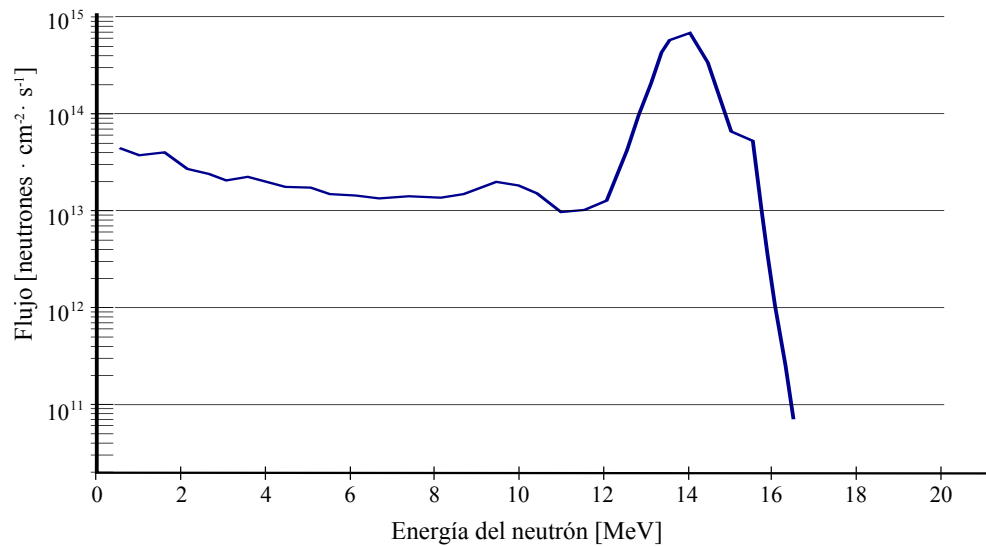
Con el *flujo neutrónico* para un reactor de 3400 MW de fusión y las *cargas neutrónicas* de la de la tabla A.1-1, se pueden extrapolar los resultados para obtener los *flujos neutrónicos* para las distintas propuestas de DEMO. Para ello, se debe tener en cuenta que 1 eV es «la *energía cinética* adquirida por un electrón al atravesar una diferencia de potencial de un volt en el vacío» [9], y que aproximadamente equivale a  $1,602\,177\,33 \cdot 10^{-19}$  J.

Estos nuevos flujos se recogen en la tabla A.1-2.

**Tabla A.1-2:** Flujos neutrónicos en las propuestas europeas para diseño conceptual de DEMO.

Parámetros	Modelo A	Modelo AB	Modelo B	Modelo C	Modelo D
Carga neutrónica, en <i>megavatios por metro cuadrado</i>	2,2	1,8	2,0	2,2	2,4
Flujo neutrónico, en <i>neutrones por centímetro cuadrado por segundo</i>	$16,7 \cdot 10^{14}$	$14,3 \cdot 10^{14}$	$12,0 \cdot 10^{14}$	$11,4 \cdot 10^{14}$	$8,5 \cdot 10^{14}$

*Elaborada por Jesús P. de Vicente con datos de la tabla A.1-1.*



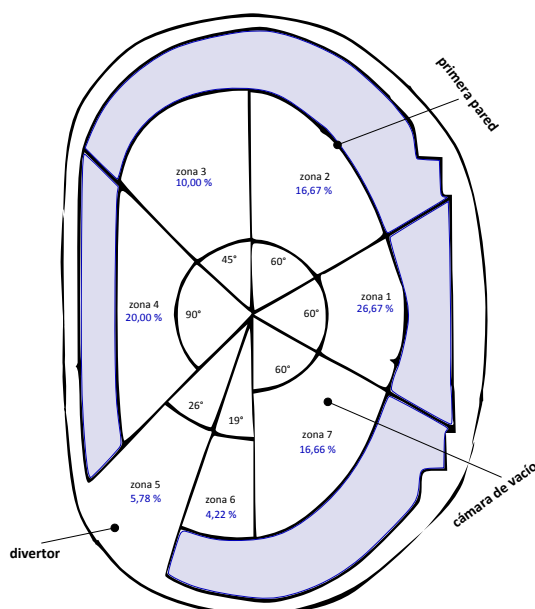
*Datos tomados de S. P. Simakov [54]. Elaborada por Jesús P. de Vicente.*

**Figura A.1-2:** Espectro neutrónico del prototipo de reactor de fusión DEMO 3400 MW.

Aunque tengamos un flujo neutrónico menor que el típico de un reactor de fisión nuclear, el daño en los reactores de fusión es mayor, debido a que los neutrones son más energéticos [55].

Una vez estimado el flujo de neutrones que impactan sobre la primera pared del reactor, es interesante conocer cual es su ángulo de impacto sobre la superficie material. Este ángulo es de gran importancia, pues determina la penetración de los neutrones. El trabajo realizado por L. J. Qiu [56] en el diseño de un pequeño reactor tipo Tokamak para la transmutación de residuos de alta actividad, determina que los neutrones impactan prácticamente de forma perpendicular a la pared del reactor. También determina que partes de la pared tienen mayor probabilidad de impacto, figura A.1-3. Esta figura A.1-3 corresponde a la sección transversal del toroide, y en ella se aprecian las diferentes zonas en función del ángulo poloidal del reactor. Siendo la zona 1, que corresponde al plano medio, la de mayor impacto sufre. No se hace estudio en función del ángulo toroidal, debido a la simetría de revolución que presenta la geometría. Supondremos que las conclusiones L. J. Qiu [56] pueden extrapolarse al Tokamak de DEMO.

Con objeto de estudiar el mayor daño posible, estudiaremos la zona de mayor impacto del *flujo neutrónico*, es decir, la del plano medio.



Tomada de L. J. Qiu [56]. Modificada y vectorizada por Jesús P. de Vicente.

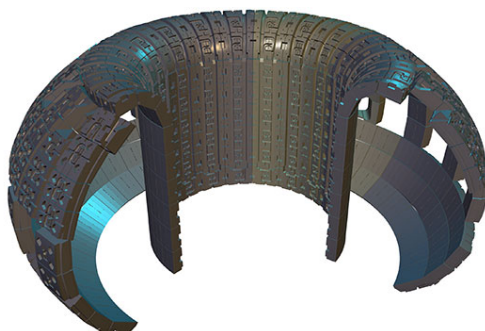
**Figura A.1-3:** Probabilidad de daño en sección transversal de Tokamak.

### A.1.2 MATERIALES IRRADIADOS

Centraremos nuestra atención en los materiales expuestos directamente a la radiación del plasma, es decir, los que constituyen la denominada *primera pared*<sup>1</sup>, que serán los que mayor daño reciben [57]. La radiación neutrónica produce daño por desplazamiento en los materiales, así como también productos de transmutación, que se traduce en impurezas. Este cambio en la microestructura puede producir la modificación de sus propiedades mecánicas y físicas [58], por lo que es de elevada importancia su estudio, para la viabilidad

<sup>1</sup>Se ha comentado que los materiales de la *primera pared* reciben directamente la radiación del plasma, pero esta afirmación no es correcta, pues el elemento más cercano al plasma es un escudo de volframio. No obstante, si es cierto que la *primera pared* constituye el elemento que mayor daño recibe por radiación. Ello es debido a que el recorrido libre medio de interacción de un neutrón con la materia es de unos centímetros, por lo que solamente una pequeña fracción de flujo neutrónico interacciona con el citado escudo protector.

económica y de la seguridad de la instalación. Aunque no sea objeto de nuestro estudio, es interesante comentar que a este daño hay que sumarle el producido por la radiación gamma del plasma y el de la elevada temperatura y campo magnético existentes. La figura A.1-4 muestra una recreación virtual de la geometría de las *primera pared* del futuro reactor experimental internacional ITER.



*Propiedad de ITER Organization.*

**Figura A.1-4:** Recreación virtual de la primera pared de ITER.

La principal función de la *primera pared* será la de dar soporte estructural. Según R. Lasser [58], los requisitos de todo material estructural para *DEMO* son varios, a saber, a) buena conductividad térmica, b) buenas propiedades mecánicas (resistencia a la tracción, a la fluencia y a la fractura), c) resistencia al desplazamiento atómico por radiación (cantidades menores de cien desplazamientos por cada átomo, *dpa*, durante toda la vida útil) y d) reducida activación. Estos requisitos deben mantenerse en un amplio rango de temperaturas, características en un reactor de este tipo. Son varios los materiales que se aproximan a satisfacer estos requisitos, y que por tanto son candidatos a usarse en la *primera pared*. Entre ellos, R. Lasser [58] considera que los más importantes son: a) los aceros ferrítico-martensíticos de baja activación (RAFM), b) los aceros RAFM reforzados con dispersiones de óxidos (OSD RAFM), c) los materiales cerámicos compuestos de matriz de SiC y d) las aleaciones de wolframio (también conocido como tungsteno, aunque la *International Union of Pure and Applied Chemistry* no recomienda el uso de este nombre). En la tabla A.1-3 se recoge la propuesta europea sobre los materiales estructurales en las diferentes alternativas de *DEMO*.

**Tabla A.1-3:** Propuesta europea sobre los materiales estructurales en las diferentes alternativas de DEMO.

	Modelo A	Modelo B	Modelo C	Modelo D
<b>Material</b>	EUROFER	EUROFER	EUROFER + OSD RAFM + SiC/SiC	SiC/SiC

*Datos tomados de R. Andreani [59].*

En la tabla A.1-4 se recoge la composición en masa de los principales elementos que constituyen el EUROFER-97 [60] y [61], que es un RAFM.

**Tabla A.1-4:** Composición en masa de los principales elementos del EUROFER-97.

valores en porcentaje de masa										
Elemento	C	Cr	W	Mn	V	Ta	N	P	S	B
composición	0,090-0,120	8,500-9,500	1,000-1,200	0,200-0,600	0,150-0,250	0,100-0,140	0,015-0,045	<0,005	<0,005	<0,001
Elemento	Al	Si	Ti	Fe	Co	Ni	Cu	Nb	Mo	O
composición	0,008	0,006	0,008	88,980	0,005	0,005	0,005	0,001	0,001	<0,010

*Datos tomados de R. Lindau [60] y S. P. Simakov [61].*

Teniendo en cuenta la composición de todos los candidatos, seleccionaremos materiales monomoleculares de *Fe*, *C*, *SiC*, *SiO<sub>2</sub>* y *W* para representarlos en los posteriores estudios de daño por radiación.

## A.2 INTERACCIÓN PARTÍCULA - MATERIA

Cuando una partícula energética (en adelante proyectil), en el vacío y en ausencia de fuerzas externas, entendiéndose por tal, que tiene un movimiento de dirección y velocidad constantes, se aproxima a un medio material (en adelante blanco), comienza a experimentar una serie de interacciones con sus átomos. Estas interacciones son de tipo gravitatorio, nuclear fuerte y electromagnético. Descartaremos las primeras, pues su importancia relativa a nivel atómico es despreciable en comparación con las otras, como se describe al comienzo del primer capítulo de la edición española [18] del libro *The Feynman Lectures on Physics, Mainly Electromagnetism and Matter, Volume II*, publicado originalmente en 1964 por el *Instituto Tecnológico de California*. En cuanto a las interacciones nucleares fuertes, son de muy corto alcance (1 fm), pues decrecen más rápido que una ley de cuadrados inversos (tipo electrostático), por lo que despreciaremos su efecto cuando el proyectil y el blanco sean iones o/y átomos, pues las interacciones electrostáticas evitarán que sus núcleos se aproximen lo suficiente como para que los hadrones interactúen. Pero no serán despreciadas cuando el proyectil sea un neutrón, pues su carga eléctrica nula sí permite esta aproximación. En este último caso, pero sólo en este, será inexistente la interacción electromagnética.

Por tanto, todo proyectil, bien sea neutrón o ión, interactuará con los átomos del blanco, cediendo su energía hasta que es tan reducida, que no le permite seguir avanzando y queda implantado en la red del material, o hasta que es capturado en una reacción nuclear, o hasta que atraviesa el espesor del blanco. Estas interacciones de partículas pueden denominarse colisiones (entiéndase por colisión como aquella interacción a distancia, que no implica necesariamente el contacto material entre las partes). Las colisiones pueden ser elásticas, aquellas donde se conserva la *energía cinética total*, o inelásticas, aquellas donde parte se transforma en otro tipo de energía. En las primeras se conserva la integridad de los agentes interactuantes, mientras que en las segundas esta integridad puede no mantenerse, como en las conocidas reacciones nucleares.

Dentro del blanco, las partículas con las que puede interaccionar el proyectil, son los núcleos y los electrones de los átomos. Respecto a las interacciones con los núcleos, si tanto el proyectil como el blanco son elementos pesados, sus interacciones generalmente conservarán la integridad de ambos, pues la sección eficaz de reacción nuclear es prácticamente inexistente. Sin embargo, si uno de ellos es ligero, o si el proyectil es un neutrón, si son entonces probables estas reacciones con los núcleos (reacciones nucleares). En cuanto a las interacciones con los electrones del blanco, sólo se producen con proyectiles iónicos (puesto que los leptones no experimentan interacción fuerte con los neutrones y no consideraremos la colisión directa), siendo colisiones inelásticas generalmente, pues parte de la *energía cinética* del proyectil se emplea en excitarlos. Evidentemente no se producen reacciones nucleares con los electrones, pues la mecánica cuántica prohíbe la aproximación e integración de éstos al núcleo. En cualquier caso, toda colisión produce el frenado del proyectil, fenómeno que suele conocerse como *stopping power*.

### A.2.1 INTERACCIÓN NEUTRÓN - ÁTOMO

Como se ha comentado antes, la interacción de un neutrón con los átomos del blanco será debida solamente a la interacción fuerte con sus núcleos. Al ser la interacción fuerte de corto alcance y la relación entre el radio atómico y el radio nuclear del orden de  $10^5$ , son largas las distancias recorridas por el proyectil entre interacciones sucesivas, pues en la mayoría de las ocasiones, el neutrón atraviesa el átomo sin interaccionar. Esto se traduce en una pérdida discreta de la energía del neutrón y en elevados rangos de penetración (motivo por el cual, comentábamos que atravesaban el escudo de volframio), mayores tanto más ligeros sean los elementos constituyentes del blanco (tienen menores radios nucleares). En el subapartado A.2.1.1 (pág. 105) haremos un estudio generalizado de la interacción de un neutrón con un núcleo del blanco, sin tener en consideración la naturaleza de sus productos. Mientras que en el subapartado A.2.1.2 (pág. 109) si se tendrá en cuenta estos productos, pero sólo los debido a la transmutación en algunas colisiones inelásticas (las reacciones nucleares). Entiéndase que las reacciones nucleares actuarán como sumideros de neutrones.

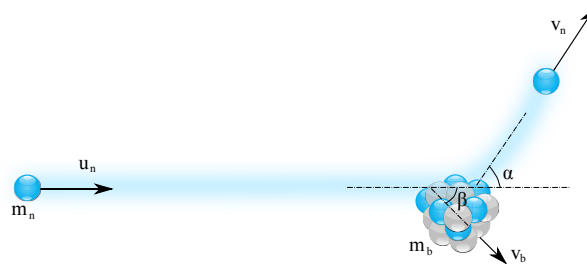
### A.2.1.1 COLISIÓN NEUTRÓN-NÚCLEO

La probabilidad de interacción de un neutrón con el núcleo de un átomo del blanco es relativamente pequeña, como ya se ha comentado. Pero cuando esta interacción ocurre, el neutrón incidente transmite parte de su energía al núcleo blanco. Si los parámetros de impacto (velocidad del neutrón y geometría del choque) son lo suficientemente elevados como para que la interacción fuerte no termine capturando al neutrón al núcleo, el neutrón proseguirá su camino, pero cediendo parte de su energía al núcleo. Si el núcleo emplea toda la energía recibida en moverse, el choque habrá sido elástico, pero si por el contrario emplea parte de ella en excitarse (sin tener en cuenta sus posteriores procesos de relajación), la colisión habrá sido inelástica. Pero si en caso contrario, los parámetros de impacto, si son los apropiados como para que la interacción fuerte aproxime al neutrón y al núcleo lo suficiente como para capturarlo, se producirá una reacción nuclear. Aquellas reacciones nucleares en las que uno de sus productos sea un neutrón, no las consideraremos como tales, pues la captura del neutrón es compensada con la generación de uno nuevo (esencia de las reacciones en cadena de las centrales de fisión); las consideraremos entonces como colisiones inelásticas.

Analicemos el caso en que se produce una colisión elásticas, donde neutrón y átomo mantienen su integridad después de la interacción y la *energía cinética* del conjunto se conserva. Esta situación puede apreciarse en la figura A.2-1, donde un neutrón con velocidad  $u_n$  y masa  $m_n$  se aproxima a un núcleo de masa  $m_b$ , que inicialmente esta en reposo, con un *parámetro de impacto*  $p$ . Tras la colisión, el neutrón se aleja con una velocidad  $v_n$ , menor que su velocidad inicial, pues ha transferido parte de su *energía cinética* al núcleo blanco, que se aleja con una velocidad  $v_b$ . La transferencia de energía sólo puede hacerse en forma de *energía cinética*, puesto que como ya se ha comentado se trata de una colisión elástica, entonces la *energía cinética* del sistema se conserva, ecuación A-2.

$$\frac{1}{2} \cdot m_n u_n^2 = \frac{1}{2} \cdot m_n v_n^2 + \frac{1}{2} \cdot m_b v_b^2 \quad (\text{A-2})$$





Propiedad de Jesús P. de Vicente, cedida al dominio público.

**Figura A.2-1:** Colisión elástica entre un neutrón y el núcleo de un átomo del blanco.

Suponiendo que sobre el sistema de partículas no actúan fuerzas externas, la aplicación de las leyes segunda y tercera de Newton, permite deducir la ley de la conservación<sup>2</sup> de la *cantidad de movimiento*, ecuación A-3.

$$m_n \vec{u}_n = m_n \vec{v}_n + m_b \vec{v}_b \quad (\text{A-3})$$

Con A-2 y A-3 formamos un sistema determinado de tres ecuaciones, donde las incógnitas son las velocidades finales de las partículas ( $\vec{v}_n$  y  $\vec{v}_b$ )<sup>3</sup>.

La solución al sistema de ecuaciones A-2 y A-3 viene dada en las ecuaciones A-4, A-5 y A-6.

$$v_n = \frac{\sqrt{(m_n + m_b)^2 - 4m_n m_b \cdot \cos \beta}}{m_n + m_b} \cdot u_n \quad (\text{A-4})$$

$$v_b = 2 \cdot \frac{m_n \cdot \cos \beta}{m_n + m_b} \cdot u_n \quad (\text{A-5})$$

$$\alpha = \frac{2 \cdot m_b}{\sqrt{(m_n + m_b)^2 - 4m_n m_b \cdot \cos \beta}} \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta \quad (\text{A-6})$$

<sup>2</sup>Hablaremos de ley y no de principio de conservación debido al carácter local, y por tanto más fuerte, de la primera.

<sup>3</sup>Puede parecer que hemos afirmado tener un sistema determinado de tres ecuaciones con cuatro incógnitas (los módulos de las velocidades vectoriales y sus ángulos de dispersión,  $\alpha$  y  $\beta$ ). Pero realmente, el *ángulo de dispersión* de la partícula blanco,  $\beta$ , es dato del sistema, pues se trata del ángulo que forma la recta que une los centros de las partículas en el momento de la colisión, con la dirección la dirección inicial del neutrón.

Nos interesa la proporción de energía que el neutrón transfiere al núcleo, que viene dada por la relación entre la ecuación A-5 y  $u_n$ , transformándolas en *energía cinética*. Esta proporción se representa en la ecuación A-7.

$$\frac{E_{\text{blanco}}}{E_{\text{neutron}}} = \frac{m_b v_b^2}{m_n u_n^2} = 4 \cdot \frac{m_n m_b}{(m_n + m_b)^2} \cdot \cos^2 \beta \quad (\text{A-7})$$

Analizando la ecuación A-7, se deduce que la máxima transferencia de energía (100 %) se produce cuando el proyectil y el blanco tienen la misma masa y la colisión es frontal ( $\beta = 0$ ). Por tanto, el elemento al que mayor energía transfiere un neutrón es el hidrógeno, motivo por el cual se usa el agua como moderador en las centrales de fisión. Aunque también es cierto, que el pequeño tamaño del núcleo del hidrógeno hace poco probable la interacción, como se comentó al comienzo del presente apartado.

Sin embargo, los materiales que usamos en nuestro estudio, están formados por elementos pesados, por lo que la masa del neutrón puede considerarse despreciable en comparación con la de los núcleos del blanco. En tal caso, la ecuación A-7, puede aproximarse mediante la ecuación A-8.

$$\frac{E_{\text{blanco}}}{E_{\text{neutron}}} = 4 \cdot \frac{m_n}{m_b^2} \cdot \cos^2 \beta \quad (\text{A-8})$$

En un medio material, el núcleo blanco evidentemente no es dispersado con una velocidad  $v_b$ , sino que emplea la energía que recibe, en intentar vencer la fuerzas interatómicas, que le mantienen en una posición estable dentro de la red cristalina. Si las supera, se produce el esperado daño en el material, del que hablaremos más adelante, pues el átomo se desplaza de la red.

Estos resultados sobre colisiones elásticas, están avalados por los resultados obtenidos por C. M. Logan [27]. Este autor, también nos proporciona, mediante la ecuación A-9 la *energía cinética* que recibe el núcleo blanco en una colisión inelástica.

Puesto que en este apartado perseguimos una descripción cualitativa, no hemos tenido en cuenta la anisotropía de los ángulos de dispersión, pues unas direcciones son más proba-

$$E_b = \frac{m_n m_b}{(m_n + m_b)^2} \cdot (2 \cdot E_n^{\text{ini}} - U - 2 \cdot (E_n^{\text{ini}} \cdot (E_n^{\text{ini}} - U))^{1/2} \cdot (1 - \cos^2 \beta) \quad (\text{A-9})$$

donde,

$E_b$ , es la energía cinética recibida por el núcleo blanco, expresada en julios.

$E_n^{\text{ini}}$ , es la energía cinética inicial del neutrón, expresada en julios.

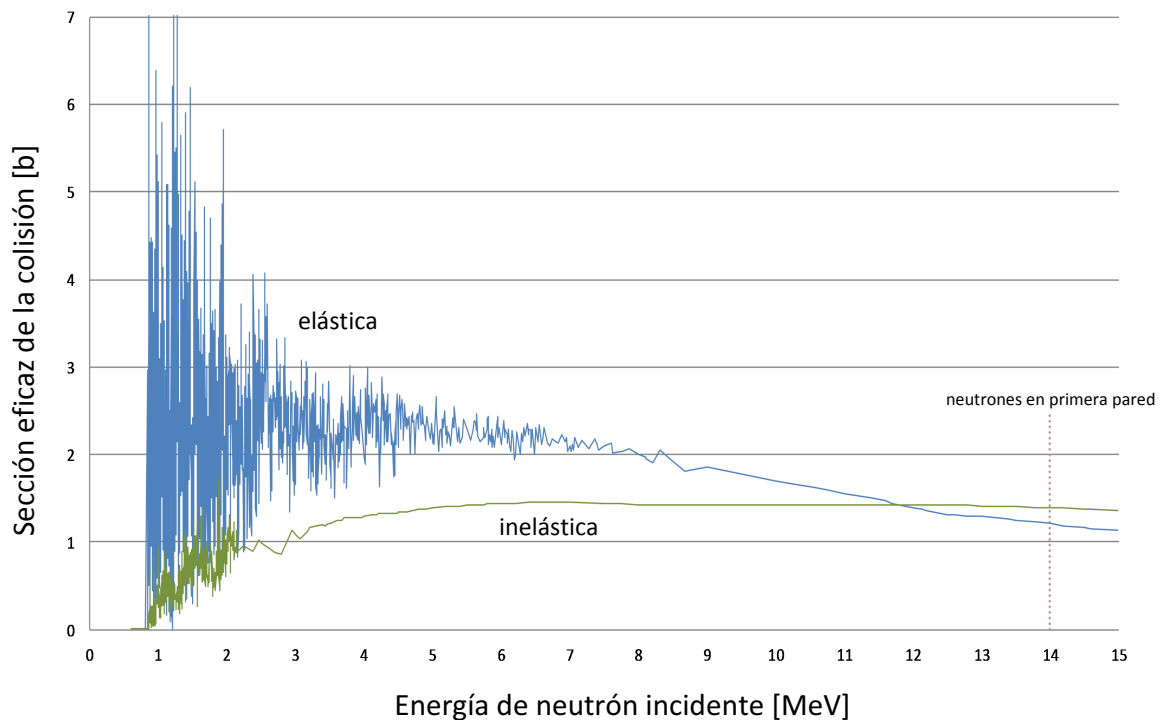
$U$ , es la variación de la energía de enlace del núcleo blanco multiplicada por un factor  $\frac{m_n + m_b}{m_b}$ , y expresada en julios.

$m_n$ , es la masa del neutrón, expresada en kilogramos.

$m_b$ , es la masa del núcleo blanco, expresada en kilogramos.

$\beta$ , es el ángulo de dispersión de núcleo blanco, medido desde la dirección inicial del neutrón, y expresado en radianes.

bles que otras para producir interacción. Con esta suposición, es interesante presentar en la figura A.2-2 datos cuantitativos sobre la probabilidad de colisión (elástica e inelástica) de un neutrón en un medio material homogéneo de hierro-56.



Elaboración propia con datos obtenidos de la ENDF/F-VII.0 de la National Nuclear Data Center.

**Figura A.2-2:** Secciones eficaces de colisión elástica e inelástica del  $^{56}_{26}\text{Fe}$  por irradiación neutrónica.

*Nota: En la figura A.2-2 la sección eficaz está expresada en barn, que es una unidad de superficie admitida por el Sistema Legal de Unidades de Medida, que equivale a  $10^{-28} \text{ m}^2$  [9]. La sección eficaz es una aproximación cuantitativa a la probabilidad de interacción. Esta aproximación podría expresarse como la relación de dos superficies: 1) la proyección de todos los lugares geométricos de posible interacción sobre el plano perpendicular al flujo de partículas incidente y 2) la superficie irradiada por dicho flujo. La sección eficaz microscópica representaría la superficie dada por 1), por partícula.*

Comparando las figuras A.2-2 y A.2-3, se puede apreciar que la radiación neutrónica deposita su energía en las paredes del reactor principalmente mediante colisiones y no mediante reacciones nucleares. Puesto que nuestro interés está centrado en la *primera pared*, solamente nos interesa el rango de energías del flujo comprendido entre los 10 MeV y 14 MeV, por lo que podemos suponer *grosso modo* una pérdida energética constante por parte del neutrón (casi de forma equitativa entre colisiones elásticas e inelásticas), que a priori, podría traducirse en la producción de un daño primario homogéneo en los materiales de la *primera pared*.

#### A.2.1.2 REACCIONES NUCLEARES

Como ya se comentó en el apartado A.1.2 (pág. 100) , las reacciones nucleares de los neutrones con la materia se traducen en la generación de impurezas, que como se verá, podrían modificar las propiedades del material. Ha quedado demostrado en la tabla A.1-3, que el candidato por excelencia a material estructural de DEMO, es el EUROFER. Por tanto, estaría justificado hacer un pequeño estudio de la posible transmutación que ocurriría en el principal elemento de este acero, que según la tabla A.1-4 es el hierro. Entonces interesa mostrar la tabla A.2-1, que muestra las principales reacciones de transmutación por radiación neutrónica en el hierro, así como también la figura A.2-3 que muestra los valores de las secciones eficaces de transmutación de su isótopo más abundante, el hierro-56.

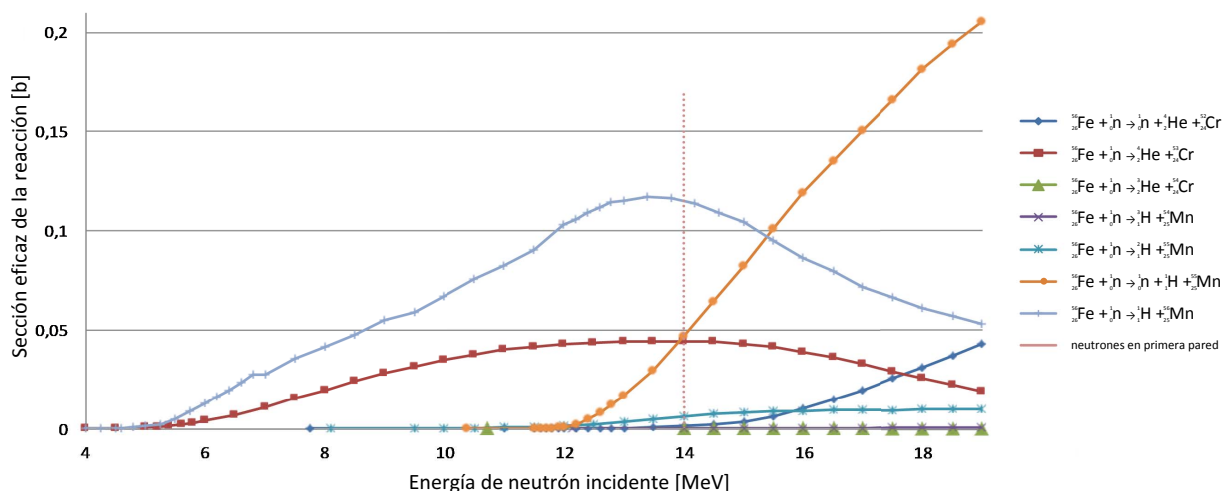
La figura A.2-3 nos muestra que cuando los neutrones procedentes directamente del plasma, principalmente con energías de 14 MeV, interaccionan con el isótopo Fe-56, uno de los productos de transmutación es un átomo pesado, y el resto son ligeros. Los átomos pesados más probables son los isótopos Mn-56, Mn-55 y Cr-53, que por su similitud ató-

**Tabla A.2-1:** Principales reacciones nucleares de transmutación producidas por neutrones en el hierro.

Isótopo	Abundancia natural (%)	Proyectil	Producto 1	Producto 2
$^{54}_{26}\text{Fe}$	5,8	$^1_0\text{n}$	$^4_2\text{He} + ^4_2\text{He}$	$^{47}_{22}\text{Ti}$
$^{54}_{26}\text{Fe}$	5,8	$^1_0\text{n}$	$^1_1\text{H} + ^4_2\text{He}$	$^{50}_{23}\text{V}$
$^{54}_{26}\text{Fe}$	5,8	$^1_0\text{n}$	$^1_0\text{n} + ^4_2\text{He}$	$^{50}_{24}\text{Cr}$
$^{54}_{26}\text{Fe}$	5,8	$^1_0\text{n}$	$^4_2\text{He}$	$^{51}_{24}\text{Cr}$
$^{54}_{26}\text{Fe}$	5,8	$^1_0\text{n}$	$^1_0\text{n} + ^1_1\text{H} + ^1_1\text{H}$	$^{52}_{24}\text{Cr}$
$^{54}_{26}\text{Fe}$	5,8	$^1_0\text{n}$	$^3_2\text{He}$	$^{52}_{24}\text{Cr}$
$^{54}_{26}\text{Fe}$	5,8	$^1_0\text{n}$	$^1_1\text{H} + ^2_1\text{H}$	$^{52}_{24}\text{Cr}$
$^{54}_{26}\text{Fe}$	5,8	$^1_0\text{n}$	$^1_1\text{H} + ^1_1\text{H}$	$^{53}_{24}\text{Cr}$
$^{54}_{26}\text{Fe}$	5,8	$^1_0\text{n}$	$^3_1\text{H}$	$^{52}_{25}\text{Mn}$
$^{54}_{26}\text{Fe}$	5,8	$^1_0\text{n}$	$^1_0\text{n} + ^1_1\text{H}$	$^{53}_{25}\text{Mn}$
$^{54}_{26}\text{Fe}$	5,8	$^1_0\text{n}$	$^2_1\text{H}$	$^{53}_{25}\text{Mn}$
$^{54}_{26}\text{Fe}$	5,8	$^1_0\text{n}$	$^1_1\text{H}$	$^{54}_{25}\text{Mn}$
$^{56}_{26}\text{Fe}$	91,7	$^1_0\text{n}$	$^1_0\text{n} + ^4_2\text{He}$	$^{52}_{24}\text{Cr}$
$^{56}_{26}\text{Fe}$	91,7	$^1_0\text{n}$	$^4_2\text{He}$	$^{53}_{24}\text{Cr}$
$^{56}_{26}\text{Fe}$	91,7	$^1_0\text{n}$	$^3_2\text{He}$	$^{54}_{24}\text{Cr}$
$^{56}_{26}\text{Fe}$	91,7	$^1_0\text{n}$	$^3_1\text{H}$	$^{54}_{25}\text{Mn}$
$^{56}_{26}\text{Fe}$	91,7	$^1_0\text{n}$	$^2_1\text{H}$	$^{55}_{25}\text{Mn}$
$^{56}_{26}\text{Fe}$	91,7	$^1_0\text{n}$	$^1_0\text{n} + ^1_1\text{H}$	$^{55}_{25}\text{Mn}$
$^{56}_{26}\text{Fe}$	91,7	$^1_0\text{n}$	$^1_1\text{H}$	$^{56}_{25}\text{Mn}$
$^{57}_{26}\text{Fe}$	2,2	$^1_0\text{n}$	$^4_2\text{He} + ^4_2\text{He}$	$^{50}_{22}\text{Ti}$
$^{57}_{26}\text{Fe}$	2,2	$^1_0\text{n}$	$^1_1\text{H} + ^4_2\text{He}$	$^{53}_{23}\text{V}$
$^{57}_{26}\text{Fe}$	2,2	$^1_0\text{n}$	$^1_0\text{n} + ^1_0\text{n} + ^4_2\text{He}$	$^{52}_{24}\text{Cr}$
$^{57}_{26}\text{Fe}$	2,2	$^1_0\text{n}$	$^1_0\text{n} + ^4_2\text{He}$	$^{53}_{24}\text{Cr}$
$^{57}_{26}\text{Fe}$	2,2	$^1_0\text{n}$	$^4_2\text{He}$	$^{54}_{24}\text{Cr}$
$^{57}_{26}\text{Fe}$	2,2	$^1_0\text{n}$	$^3_2\text{He}$	$^{55}_{24}\text{Cr}$
$^{57}_{26}\text{Fe}$	2,2	$^1_0\text{n}$	$^1_1\text{H} + ^1_1\text{H}$	$^{56}_{24}\text{Cr}$
$^{57}_{26}\text{Fe}$	2,2	$^1_0\text{n}$	$^1_0\text{n} + ^2_1\text{H}$	$^{55}_{25}\text{Mn}$
$^{57}_{26}\text{Fe}$	2,2	$^1_0\text{n}$	$^1_0\text{n} + ^1_0\text{n} + ^1_1\text{H}$	$^{55}_{25}\text{Mn}$
$^{57}_{26}\text{Fe}$	2,2	$^1_0\text{n}$	$^3_1\text{H}$	$^{55}_{25}\text{Mn}$
$^{57}_{26}\text{Fe}$	2,2	$^1_0\text{n}$	$^1_0\text{n} + ^1_1\text{H}$	$^{56}_{25}\text{Mn}$
$^{57}_{26}\text{Fe}$	2,2	$^1_0\text{n}$	$^2_1\text{H}$	$^{56}_{25}\text{Mn}$
$^{57}_{26}\text{Fe}$	2,2	$^1_0\text{n}$	$^1_1\text{H}$	$^{57}_{25}\text{Mn}$
$^{58}_{26}\text{Fe}$	0,3	$^1_0\text{n}$	$^4_2\text{He} + ^4_2\text{He}$	$^{51}_{22}\text{Ti}$
$^{58}_{26}\text{Fe}$	0,3	$^1_0\text{n}$	$^1_0\text{n} + ^4_2\text{He}$	$^{54}_{24}\text{Cr}$
$^{58}_{26}\text{Fe}$	0,3	$^1_0\text{n}$	$^4_2\text{He}$	$^{55}_{24}\text{Cr}$
$^{58}_{26}\text{Fe}$	0,3	$^1_0\text{n}$	$^3_2\text{He}$	$^{56}_{24}\text{Cr}$
$^{58}_{26}\text{Fe}$	0,3	$^1_0\text{n}$	$^3_1\text{H}$	$^{56}_{25}\text{Mn}$
$^{58}_{26}\text{Fe}$	0,3	$^1_0\text{n}$	$^2_1\text{H}$	$^{57}_{25}\text{Mn}$
$^{58}_{26}\text{Fe}$	0,3	$^1_0\text{n}$	$^1_0\text{n} + ^1_1\text{H}$	$^{57}_{25}\text{Mn}$
$^{58}_{26}\text{Fe}$	0,3	$^1_0\text{n}$	$^1_1\text{H}$	$^{58}_{25}\text{Mn}$

Datos obtenidos de la base de datos ENDF/F-VII.0 de la National Nuclear Data Center.

mica con el Fe-56, ocuparán su posición en la red de material. Entre los átomos ligeros, los más probables son los de los isótopos H-1 y He-4, que como se verá más adelante, se desplazan por la red produciendo poco *daño primario* en el material, pero su acumulación en forma de gas en las microfracturas, puede producir daño apreciable en las etapas de evolución del *daño primario*. Por tanto, es de elevada importancia conocer los productos



Elaboración propia con datos obtenidos de ENDF/F-VII.0 de la National Nuclear Data Center.

**Figura A.2-3:** Secciones eficaces de transmutación del  $^{56}\text{Fe}$  por irradiación neutrónica.

de transmutación generados en el EUROFER por el *flujo neutrónico*. La generación de estos productos ha sido calculada computacionalmente por U. Fischer [62]. Sus resultados están representados en la tabla A.2-2, donde se muestra la evolución en la composición del EUROFER debido a estos fenómenos de transmutación.

Vuelve a ponerse de manifiesto la elevada concentración de hidrógeno y helio, que al ser elementos ligeros, no reemplazan a los átomos de la red, migrando por el material hasta acumularse en forma molecular (gas) para producir diferentes formas de daño.

## A.2.2 INTERACCIÓN IÓN - ÁTOMO

Cuando un ión de energía determinada, penetra en la red de un material, se producen interacciones con los átomos de la red. Estas interacciones son debidas a las fuerzas electromagnéticas que se generan entre los protones y los electrones, tanto del proyectil como del blanco. Como ya se comentó en el apartado A.2 (pág. 103), las interacciones nucleares fuertes se desprecian, a no ser que el proyectil alcance velocidades relativistas (cientos de megaelectronvoltios por nucleón), donde sus electrones se desprenden, siendo más fácil la aproximación entre hadrones [63].

**Tabla A.2-2:** Evolución anual de la composición del EUROFER expuesto a la radiación neutrónica de un reactor de fusión.

Elemento	Composición inicial (ppm)	Variación anual (ppm)
H	-	1051
He	-	249
Li	-	0,9
Be	-	2,3
B	51	0,5
C	4860	-4,6
N	1191	-3,5
O	347	-0,8
Mg	-	1,4
Al	206	0,2
Si	990	-1,2
P	90	-0,01
S	87	-0,3
Ti	116	19
V	2183	164
Cr	96 240	74
Mn	4048	601
Fe	885 880	-752
Co	47	-0,02
Ni	47	-0,3
Cu	44	-0,3
Nb	6	0,01
Mo	29	-0,07
Hf	-	1,1
Ta	215	1,3
W	3327	-19
Re	-	17
Os	-	0,2

*Datos tomados de U. Fischer [62].*

Cuando el ión proyectil interacciona con los electrones del blanco, la colisión es inelástica, pues la energía que recibe el electrón se emplea en excitarse, pudiendo promocionar de nivel o relajarse emitiendo radiación gamma. En cualquier caso, este fenómeno se traduce en la pérdida continua de energía del proyectil, como si se tratara del movimiento de una partícula en un medio viscoso. En los metales, elementos objeto del presente estudio, la relajación de la energía adquirida por los electrones, se hace en forma de calor, no produciendo entonces daño primario en los elementos de la red (no quiere ello decir que una mala refrigeración del material no pudiera producir daño macroscópico), puesto que la masa del electrón no le permite tener suficiente momento como para desplazar a un átomo de la red. Por lo que en este anexo no proseguiremos en su estudio.

Sin embargo si la interacción se produce entre los núcleos, de ión y átomo del blanco, la energía transferida, independientemente de colisión elástica o inelástica, si puede producir daño primario, motivo por el cual se hace requisito imprescindible su estudio.

Si nuevamente se supone la ausencia de fuerzas externas al sistema formado por la pareja de partículas, sigue siendo de aplicación la ley de conservación de la *cantidad de movimiento*. Entonces, si la colisión es elástica, ésta queda definida por las ecuaciones A-4, A-5 y A-6, y si la colisión es inelástica, la *energía cinética* adquirida por el blanco, será la dada por la ecuación A-9<sup>4</sup>.

Disponer de expresiones analíticas para otras leyes de conservación para las interacciones electrostáticas entre cargas, permite disponer de nuevas vías con las que analizar la colisión, como por ejemplo la utilización de la *ley conservación de la energía*. Esta expresión junto con la ley de conservación del *momento angular* nos proporcionaría información detallada sobre la interacción, pudiéndose determinarse, en algunos casos, la trayectoria seguida por el proyectil. A continuación intentaremos obtener la trayectoria de un proyectil iónico, desviado por un centro dispersor electrostático (el núcleo blanco), pero antes de ello expondremos algunos conceptos básicos necesarios.

#### A.2.2.1 FUERZA CENTRAL Y CONSERVATIVA

Como ya se ha comentado, la interacción causante de la dispersión entre ión y átomo es la electrostática. Esta interacción puede modelarse mediante la acción de una fuerza central, ecuación A-12, es decir, la dirección de su acción es la misma que la que une los centros de las partículas interactuantes. Si situamos un sistema de referencia fijo, en el centro dispersor, el momento de esta fuerza es nulo, ecuación A-10, pues es paralelo al vector de posición en todo momento.

$$\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F} = \vec{0} \quad (\text{A-10})$$

---

<sup>4</sup>Nótese que estas soluciones (elásticas e inelásticas) corresponden al régimen permanente, es decir, cuando las partículas se han alejado lo suficiente como para considerarse despreciable la interacción entre ellas.



Por otro lado, el teorema del *momento angular* establece que la derivada temporal del momento angular es igual al momento de las fuerzas actuantes, como puede demostrarse en la expresión A-11.

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \frac{d}{dt}(\vec{r} \times m\vec{v}) = \cancel{\vec{v} \times m\vec{v}} + \vec{r} \times \frac{dm\vec{v}}{dt} = \vec{r} \times \vec{F} = \vec{M} \quad (\text{A-11})$$

Entre las de las ecuaciones A-10 y A-11 se observa que el *momento angular*,  $\vec{L}$ , es constante. Entonces puesto que  $\vec{L}$  es perpendicular al vector de posición del proyectil,  $\vec{r}$ , y a su velocidad,  $\vec{v}$ , se deduce que el movimiento de una partícula sometida a una fuerza central, es un movimiento plano.

La fuerza electrostática puede describirse mediante la ley de Coulomb, ecuación A-12.

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \cdot \frac{z_p z_b}{r^2} \cdot \frac{\vec{r}}{r} \quad (\text{A-12})$$

donde,

$\vec{F}$ , es la fuerza electrostática, expresada en newtons.

$\epsilon$ , es la permitividad del medio, expresada en culombios por voltio por metro.

$z_p$ , es la carga eléctrica del proyectil, expresada en coulombs.

$z_b$ , es la carga eléctrica del núcleo blanco, expresada en coulombs.

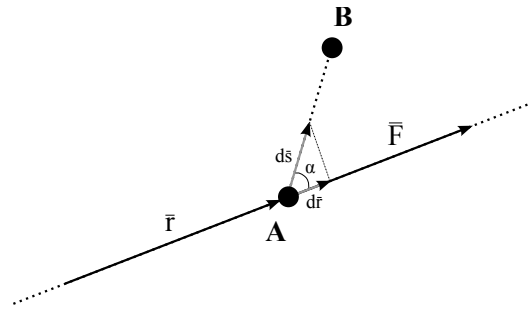
$\vec{r}$ , es el vector de posición del proyectil desde el blanco, medido en metros.

Para que esta fuerza sea conservativa, es decir, se conserve la energía total de la partícula sobre la que actúa, es condición necesaria y suficiente que cumpla alguna de tres condiciones (equivalentes entre ellas), a saber, a) que derive de una función potencial escalar, b) que el trabajo que realice sea independiente de la geometría del dominio de integración, aunque no de su frontera, y c) que la aplicación del operador vectorial rotacional sea nulo. Intentaremos demostrar la tercera de ellas en la expresión A-13.

Una vez comprobado que la fuerza electrostática es conservativa, se trata de determinar la función potencial escalar de la que deriva. Para ello haremos uso de la segunda de las condiciones enumeradas antes, que hace referencia a la independencia de la forma del dominio de integración (aunque no de su frontera), ecuación A-14, apoyándonos en la figura A.2-4, donde una partícula sometida a una fuerza  $\vec{F}$ , que recorre un camino  $s$ ,

$$\begin{aligned}
\nabla \times \vec{F} &= \frac{\kappa}{4\pi\epsilon} \cdot \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{r_x}{r^3} & \frac{r_y}{r^3} & \frac{r_z}{r^3} \end{vmatrix} = \frac{\kappa}{r^4} \left( r \frac{\partial r_z}{\partial y} - 3r_z \frac{\partial r}{\partial y} - r \frac{\partial r_y}{\partial z} + 3r_y \frac{\partial r}{\partial z} \right) \cdot \vec{i} - \\
&- \frac{\kappa}{r^4} \left( r \frac{\partial r_z}{\partial x} - 3r_z \frac{\partial r}{\partial x} - r \frac{\partial r_x}{\partial z} + 3r_x \frac{\partial r}{\partial z} \right) \cdot \vec{j} + \\
&+ \frac{\kappa}{r^4} \left( r \frac{\partial r_y}{\partial x} - 3r_y \frac{\partial r}{\partial x} - r \frac{\partial r_x}{\partial y} + 3r_x \frac{\partial r}{\partial y} \right) \cdot \vec{k} = \\
&= \frac{\kappa}{r^4} \left( -\cancel{3r_z r_y r^{-1/2}} + \cancel{3r_y r_z r^{-1/2}} \right) \cdot \vec{i} - \\
&- \frac{\kappa}{r^4} \left( -\cancel{3r_x r_z r^{-1/2}} + \cancel{3r_z r_x r^{-1/2}} \right) \cdot \vec{j} + \frac{\kappa}{r^4} \left( -\cancel{3r_y r_x r^{-1/2}} + \cancel{3r_x r_y r^{-1/2}} \right) \cdot \vec{k} = \vec{0}
\end{aligned}
\tag{A-13}$$

desde la posición  $A$  a la  $B$ . La proyección de un diferencial de longitud del segmento  $\overrightarrow{AB}$  sobre la dirección de la fuerza  $\vec{F}$ , coincide con la dirección del vector de posición  $\vec{r}$ . Por lo que de la figura A.2-4, se puede establecer una relación entre un diferencial de  $\overrightarrow{AB}$ ,  $d\vec{s}$ , y un diferencial de  $\vec{r}$ ,  $d\vec{r}$ , siendo el parámetro de proporcionalidad el coseno del ángulo que forman,  $\cos \alpha$ .



*Propiedad de Jesús P. de Vicente, cedida al dominio público.*

**Figura A.2-4:** Recorrido de una partícula sometida a una fuerza  $\vec{F}$ .

Con la definición de operador gradiente, en la ecuación A-15 podemos demostrar, al igual que en la ecuación A-14, que la forma del dominio de integración es indiferente, siempre y cuando se mantenga su frontera. Comparado las ecuaciones A-14 y A-15, se obtiene una expresión general para la función potencial escalar, ecuación A-16.

$$\begin{aligned}
\int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{s} &= \frac{z_n z_b}{4\pi\epsilon} \int_A^B \frac{1}{r^2} \vec{e}_r \cdot d\vec{s} = \frac{z_n z_b}{4\pi\epsilon} \int_A^B \frac{1}{r^2} \cos \alpha \cdot ds = \\
&= \frac{z_n z_b}{4\pi\epsilon} \int_A^B \frac{1}{r^2} \cdot dr = -\frac{z_n z_b}{4\pi\epsilon} \cdot \left[ \frac{1}{r} \right]_A^B = -\frac{z_n z_b}{4\pi\epsilon} \cdot \left( \frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right)
\end{aligned} \tag{A-14}$$

donde,

$\vec{e}_r$ , es el vector unitario de la dirección del vector de posición,  $\vec{r}$ , sin dimensiones.

$d\vec{s}$ , es un diferencial de longitud de la dirección  $\overrightarrow{AB}$ , expresado en metros.

$$\int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{s} = \int_A^B -\nabla\phi \cdot d\vec{s} = -\int_A^B d\phi = \phi_A - \phi_B \tag{A-15}$$

donde,

$\phi$ , es la función potencial escalar, expresada en julios.

$$\phi = \frac{z_n z_b}{4\pi\epsilon} \cdot \frac{1}{r} \tag{A-16}$$

El objetivo de todo este desarrollo, es demostrar que la diferencia de los valores que la función potencial adquiere en dos puntos, corresponde al trabajo realizado por la fuerza electrostática para recorrer un camino cualquiera que los una. Entonces, la función potencial llevaría implícita la capacidad para realizar un trabajo, es decir, es energía. Tenemos definida por tanto la *energía potencial* de un proyectil iónico, dentro del campo electrostático generado por un núcleo blanco.

#### A.2.2.2 CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA DEL PROYECTIL

La *energía cinética* junto con la *energía potencial* de un proyectil iónico, que se mueve dentro del campo electrostático creado por un núcleo del material blanco, constituyen la energía total de la partícula.

Es interesante que una parte de la energía del proyectil, sea de tipo potencial conservativo, puesto que nos permitirá individualizar la *ley de conservación de la energía* a un proyectil que interacciona elásticamente. Es decir, la *energía cinética* que pierda un proyectil, debido a las colisiones elásticas con los núcleos, se transformará en *energía potencial*. Esta es la justificación del adjetivo conservativo para este tipo de fuerzas. La ecuación A-17 nos indica que el trabajo realizado por una fuerza conservativa, es debida a una cantidad de energía,

que corresponde a la variación de *energía cinética* que sufre la partícula. Pero este trabajo, también se puede expresar como la variación de la *energía potencial*, cambiada de signo, expresada en la ecuación A-15. Por tanto, igualando ambas expresiones, se observa que la suma de la *energía cinética* y *energía potencial* es un punto cualquiera es siempre constante, expresión A-18. A esta constante, la denominaremos *energía total*,  $E$ , del proyectil, ecuación A-19.

$$\begin{aligned} \int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{s} &= \int_{t_A}^{t_B} \frac{dm \vec{v}}{dt} \cdot \vec{v} dt = \int_{t_A}^{t_B} \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} m \vec{v}^2 \right) \cdot dt = \\ &= \int_{t_A}^{t_B} \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} m v^2 \right) \cdot dt = \frac{d}{dt} \int_{t_A}^{t_B} \left( \frac{1}{2} m v^2 \right) \cdot dt = \left( \frac{1}{2} m v^2 \right) \Big|_A^B = E_B^c - E_A^c \end{aligned} \quad (A-17)$$

donde,

$\vec{v}$ , es la velocidad de la partícula, expresada en metros por segundo.

$E^c$ , es la energía cinética de la partícula, expresada en julios.

$$E_B^c - E_A^c = U_A - U_B \longrightarrow E_B^c + U_B = E_A^c + U_A = E \quad (A-18)$$

donde,

$U$ , es la energía potencial de la partícula, expresada en julios.

$$E = \frac{1}{2} m v^2 + \frac{z_n z_b}{4\pi\epsilon} \cdot \frac{1}{r} \quad (A-19)$$

### A.2.2.3 SISTEMA DE REFERENCIA

Estableceremos un nuevo sistema de referencia ortonormal, igualmente solidario al centro dispersor, es decir, al núcleo blanco, pero con una base de referencia variable. Esta base estará formada por dos vectores unitarios, puesto que en el subapartado A.2.2.1 (pág. 113) se demostró que el movimiento del proyectil estará contenido en un plano. Uno de ellos será paralelo a la dirección del vector de posición del proyectil, y el otro será perpendicular, con sentido correspondiente al de los ángulos crecientes. La relación entre el sistema de referencia antiguo y el nuevo, será la dada por la expresión A-20.

Según este nuevo sistema de referencia, el vector de posición del proyectil, quedaría definido por la ecuación A-21. Y la velocidad, por la ecuación A-22.

$$\begin{aligned}\vec{e}_r &= \cos \varphi \cdot \vec{i} + \sin \varphi \cdot \vec{j} \\ \vec{e}_\varphi &= -\sin \varphi \cdot \vec{i} + \cos \varphi \cdot \vec{j}\end{aligned}\quad (\text{A-20})$$

donde,

$\vec{e}_r$  y  $\vec{e}_\varphi$ , son los vectores unitarios que forma la base ortonormal del nuevo sistema de referencia, adimensionales.

$\varphi$ , es el ángulo formado por el vector de posición,  $\vec{r}$ , y el vector unitario fijo,  $\vec{i}$ , expresado en radianes.

$$\vec{r} = r \cdot \vec{e}_r \quad (\text{A-21})$$

$$\begin{aligned}\vec{v} &= \frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{dr}{dt} \cdot \vec{e}_r + r \cdot \frac{d\vec{e}_r}{dt} = \\ &= \dot{r} \cdot \vec{e}_r + r\dot{\varphi} \left( -\sin \varphi \cdot \vec{i} + \cos \varphi \cdot \vec{j} \right) = \dot{r} \cdot \vec{e}_r + r\dot{\varphi} \cdot \vec{e}_\varphi\end{aligned}\quad (\text{A-22})$$

Con la nueva expresión de la velocidad,  $\vec{v}$ , podemos también expresar la ecuación de la energía total del proyectil, ecuación A-23, y la del momento angular, ecuación A-24, en el nuevo sistema de referencia.

$$E = \frac{1}{2}m \left( \frac{dr}{dt} \right)^2 + \frac{1}{2}mr^2 \left( \frac{d\varphi}{dt} \right)^2 + \frac{\kappa}{r} \quad (\text{A-23})$$

donde,

$\kappa$ , es un parámetro que depende de la cargas eléctricas del proyectil y del blanco, así como también de la de permitividad del medio,  $\epsilon$ . Su valor es  $\frac{z_p z_b}{4\pi\epsilon}$ , expresado en julios metros.

$$\begin{aligned}\vec{L} &= \vec{r} \times m\vec{v} = \vec{r} \times m\dot{r} \cdot \vec{e}_r + \vec{r} \times mr\dot{\varphi} \cdot \vec{e}_\varphi = \\ &= mr^2 \frac{d\varphi}{dt} \cdot \vec{k} \rightarrow L = mr^2 \frac{d\varphi}{dt}\end{aligned}\quad (\text{A-24})$$

#### A.2.2.4 TRAYECTORIA DEL PROYECTIL

Ya se ha comentado, que la energía del proyectil,  $E$ , y su momento angular,  $\vec{L}$ , permanecen constantes durante su interacción con el núcleo de un átomo del blanco. Por tanto, las usaremos para obtener la trayectoria  $d\varphi/dr$  del proyectil. De la expresión del momento angular A-24, referido al nuevo sistema de coordenadas giratorio, puede obtenerse la expresión dada por la ecuación A-25.

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{L}{mr^2 \Delta \varphi} \quad (\text{A-25})$$

Hagamos el mismo desarrollo en la ecuación de la energía total del proyectil, ecuación A-23, para dejarla en la forma de la ecuación A-26.

$$E = \frac{1}{2}m \left( \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta r}{\Delta t} \right)^2 + \frac{1}{2}mr^2 \left( \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \varphi}{\Delta t} \right)^2 + \frac{\kappa}{r} \quad (\text{A-26})$$

Introduciendo la ecuación A-25 en la ecuación A-26, obtenemos la expresión A-27.

$$\begin{aligned} E &= \frac{1}{2}m \left( \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{L}{mr^2} \cdot \frac{\Delta r}{\Delta \varphi} \right)^2 + \frac{1}{2}mr^2 \left( \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{L}{mr^2} \right)^2 + \frac{\kappa}{r} \\ \rightarrow \quad \frac{mr^2}{L} \cdot \left( \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \varphi}{\Delta r} \right) &= \sqrt[2]{\frac{2}{m} \cdot \left( E - \frac{L^2}{2mr^2} - \frac{\kappa}{r} \right)} \\ \rightarrow \quad \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \Delta \varphi &= \lim_{\Delta r \rightarrow 0} \frac{\frac{L}{mr^2}}{\sqrt{\frac{2}{m} \cdot \left( E - \frac{L^2}{2mr^2} - \frac{\kappa}{r} \right)}} \cdot \Delta r \\ \rightarrow \quad \varphi &= \int_s \frac{\frac{L}{mr^2}}{\sqrt{\frac{2}{m} \cdot \left( E - \frac{L^2}{2mr^2} - \frac{\kappa}{r} \right)}} \cdot dr \end{aligned} \quad (\text{A-27})$$

Tenemos por tanto, la trayectoria que sigue el proyectil bajo la influencia de un campo electrostático. Pero la solución que propone la expresión A-27 está en forma integral. Un camino para resolverla, sería hacer el cambio de variable  $u = 1/r$ . La relación entre los diferenciales de las variables en este cambio sería  $dr = -r^2 du$ . Aplicando este cambio, obtenemos la ecuación A-28.

$$\varphi = -\frac{L}{\sqrt{2m}} \cdot \int_u \frac{du}{\sqrt{E - \frac{L^2}{2m}u^2 - \kappa u}} \quad (\text{A-28})$$

Para simplificar la notación, agrupemos las constantes en otras nuevas:  $a = \frac{L^2}{2m}$ ,  $b = \kappa$  y  $c = E$ . Tenemos entonces la ecuación A-29.

$$\varphi = -\frac{L}{\sqrt{2m}} \cdot \int_u \frac{du}{\sqrt{-au^2 - bu + c}} = -\frac{L}{\sqrt{2m}} \cdot \int_u \frac{du}{\sqrt{a \left( -\left(u + \frac{b}{2a}\right)^2 + \frac{b^2}{4a^2} + \frac{c}{a} \right)}} \quad (\text{A-29})$$

Hagamos un nuevo cambio de variable:  $u + \frac{b}{2a} = \sqrt{\frac{c}{a} + \frac{b^2}{4a^2}} \cdot \cos t$ . Diferenciando este cambio, tenemos  $du = -\sqrt{\frac{c}{a} + \frac{b^2}{4a^2}} \sin t \cdot dt$ . La ecuación A-30 es el resultado de introducir este nuevo cambio en la ecuación A-29.

$$\varphi = \frac{L}{\sqrt{2m}} \cdot \int_t \frac{\sqrt{\frac{c}{a} + \frac{b^2}{4a^2}} \sin t}{\sqrt{a \left( \frac{c}{a} + \frac{b^2}{4a^2} \right) (1 - \cos^2 t)}} \cdot dt = \frac{L}{\sqrt{2m}} \cdot \frac{1}{\sqrt{a}} \int_t dt = t \quad (\text{A-30})$$

Se ha conseguido eliminar la forma integral, por lo que sólo resta deshacer los cambios de variable, para obtener la ecuación A-31.

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} + \frac{m\kappa}{L^2} &= \sqrt{\frac{2Em}{L^2} \frac{m^2\kappa^2}{L^4}} \cos \varphi \\ \rightarrow \frac{1}{r} &= \frac{m\kappa}{L^2} \left( -1 + \sqrt{1 + \frac{2EL^2}{m\kappa^2}} \cos \varphi \right) \end{aligned} \quad (\text{A-31})$$

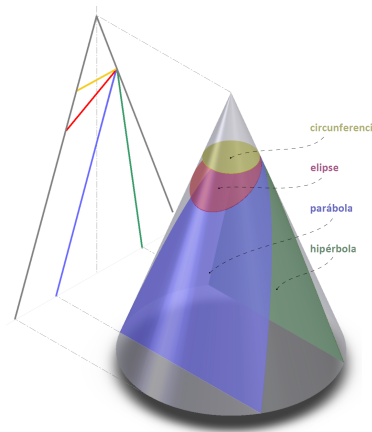
Despejando el módulo del vector de posición,  $r$ , de la ecuación A-31, tenemos la trayectoria, descrita en la ecuación A-32.

$$r = \frac{\frac{L^2}{m\kappa}}{-1 + \sqrt{1 + \frac{2EL^2}{m\kappa^2}} \cos \varphi} \quad (\text{A-32})$$

#### A.2.2.5 ANÁLISIS DE LA TRAYECTORIA

En este apartado, intentaremos demostrar que la trayectoria obtenida en la ecuación A-32 corresponde a una cónica. La definición original de cónica, es la de aquella curva formada por la intersección de la superficie de un cono de revolución con un plano cualquiera que no pase por su vértice. En la figura A.2-5 se observan los diferentes tipos de cónicas, a saber, a) si el plano de corte es paralelo a la base del cono, la cónica obtenida es una circunferencia, b) si el plano tiene la misma inclinación que el ángulo de conicidad, la

cónica es una parábola c) si es menor, tenemos una elipse y d) y si es mayor, una hipérbola.



*Imagen cedida al dominio público por el titular del copyright, Roman Neumüller.*

**Figura A.2-5:** Formación de las diferentes curvas cónicas mediante la intersección con un plano.

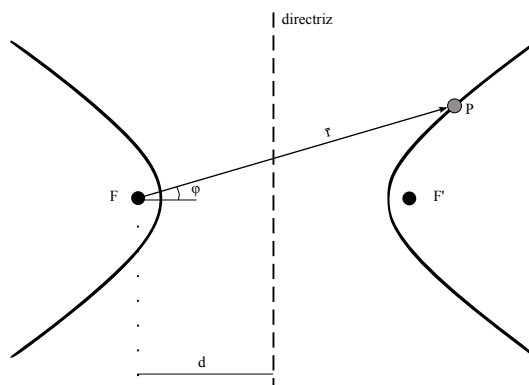
Pero otra forma de definir una cónica es como el lugar geométrico de todos los puntos,  $p$ , del plano, cuya distancia a un punto fijo, denominado foco,  $F$ , y a una recta fija, denominada directriz,  $d$ , son proporcionales, ecuación A-33. La constante de proporcionalidad se denomina excentricidad,  $e$ . Si  $e = 0$ , la cónica es una circunferencia, si  $0 < e < 1$ , se trata de una elipse, si  $e = 1$ , es una parábola, y si  $e > 1$ , es una hipérbola.

$$|\vec{PF}| = e |\vec{Pd}| \quad (\text{A-33})$$

Por tanto, si situamos un sistema de referencia polar en uno de los focos de una cónica, con el eje polar paralelo a la recta que une los focos, como por ejemplo se muestra en la figura A.2-6, la ecuación A-33 puede expresarse por la ecuación A-34.

Comparando las ecuaciones A-32 y A-34, deducimos que la trayectoria seguida por el proyectil es una curva cónica, con excentricidad,  $e = \sqrt{1 + \frac{2EL^2}{mk^2}}$ , con el centro dispersor situado en uno de sus focos. Ya se ha comentado, que la interacción es entre cargas positivas, por lo que el valor de  $\kappa$  es positivo. En consecuencia, el valor de la excentricidad es





Propiedad de Jesús P. de Vicente, cedida al dominio público.

**Figura A.2-6:** Representación de una curva cónica genérica.

$$r = e(r \cos \varphi - d) \quad \rightarrow \quad r = \frac{ed}{-1 + e \cos \varphi} \quad (\text{A-34})$$

mayor que uno, y la cónica es una hipérbola. Si denominamos *parámetro de impacto*,  $p$ , a la distancia entre el núcleo blanco y la dirección de la velocidad inicial del proyectil (que coincide con una de las asíntotas de la hipérbola), el *momento angular* podemos expresarlo como  $|\vec{L}| = pm |\vec{u}_p|$ . Por otro lado, suponiendo que el proyectil viene desde el infinito, su *energía potencial*  $\frac{\kappa}{r}$  es nula, y por tanto su energía total es completamente cinética  $E = \frac{1}{2}mu_p^2$ . Puesto que el *momento angular* y la energía total eran constantes, podemos usar estos valores para expresar la excentricidad por la ecuación A-35.

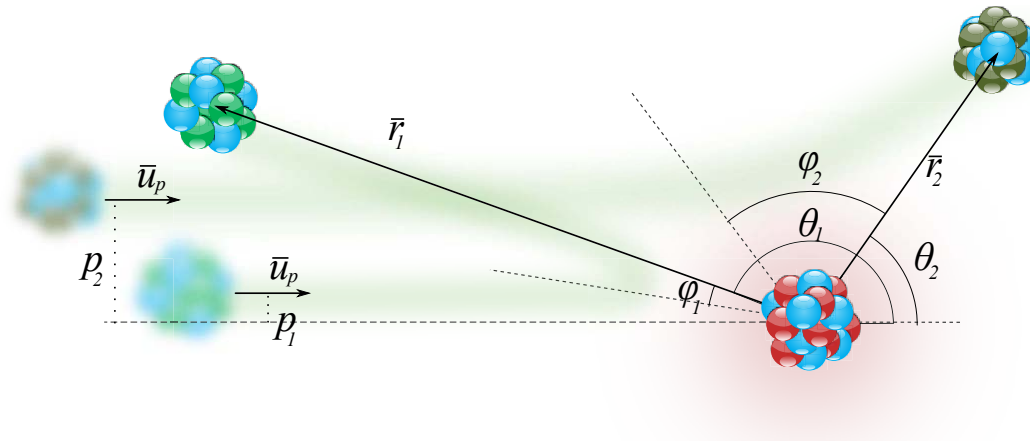
$$e = \sqrt{1 + \left(\frac{2pE}{\kappa}\right)^2} \quad (\text{A-35})$$

Por otro lado, sería interesante calcular el ángulo con el que el proyectil se aleja hasta el infinito. Para ello, basta suponer  $r \rightarrow \infty$  en la expresión A-34, para obtener  $\varphi_{r \rightarrow \infty}$ , ecuación A-36.

$$\varphi_{r \rightarrow \infty} = \arccos \frac{1}{e} = \arccos \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{2pE^2}{\kappa}}} \quad (\text{A-36})$$

El ángulo  $\varphi_{r \rightarrow \infty}$  es el ángulo formado por una de las asíntotas de la hipérbola con uno de sus ejes, tal como se muestra en la figura A.2-7. En esta figura se aprecia la importancia

del *parámetro de impacto*,  $p$ , en la trayectoria de todo proyectil. Dos iones iguales y con igual energía, pero diferente *parámetro de impacto*, se aproximan al núcleo blanco. Mientras que el de bajo *parámetro de impacto* es retrocedido con un ángulo  $\varphi_1$ , el de mayor parámetro, solamente es desviado un ángulo  $\varphi_2$  de su trayectoria.



Propiedad de Jesús P. de Vicente, cedida al dominio público.

**Figura A.2-7:** Trayectorias seguidas por dos iones proyectiles de diferente *parámetro de impacto*, al interactuar con el núcleo de un átomo blanco.

En esta figura A.2-7 se deduce que sería interesante referir los ángulos, con que se alejan los proyectiles, a una recta común. Para ello, se define el *ángulo de dispersión*,  $\theta$ , que es el ángulo suplementario al ángulo comprendido entre las dos asíntotas de una misma trayectoria. La recta común es debida a que las trayectorias de los dos proyectiles, tienen una asíntota en común (la correspondiente a la velocidad inicial del proyectil). Por tanto, la relación entre  $\theta$  y  $\varphi_{r \rightarrow \infty}$  es la dada por la ecuación A-37.

$$\theta = \pi - 2\varphi_{r \rightarrow \infty} = \pi - 2 \arccos \frac{1}{e} \quad (\text{A-37})$$

No obstante, si se trabaja con la tangente del ángulo medio de dispersión,  $\frac{\theta}{2}$ , se obtiene una expresión más simplificada, como se aprecia en la expresión A-38.

$$\begin{aligned}
\tan \frac{\theta}{2} &= \tan \left( \frac{\pi}{2} - \arccos \frac{1}{e} \right) = \frac{\tan \frac{\pi}{2} - \tan \left( \arccos \frac{1}{e} \right)}{1 + \tan \frac{\pi}{2} \cdot \tan \left( \arccos \frac{1}{e} \right)} = \frac{1}{\tan \left( \arccos \frac{1}{e} \right)} = \\
&= \frac{\cos \left( \arccos \frac{1}{e} \right)}{\sin \left( \arccos \frac{1}{e} \right)} = \frac{\frac{1}{e}}{\sqrt{1 - \cos^2 \left( \arccos \frac{1}{e} \right)}} = \frac{\frac{1}{e}}{\sqrt{1 - \left( \frac{1}{e} \right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{e^2 - 1}} = \quad (A-38) \\
&= \frac{\kappa}{2pE}
\end{aligned}$$

De la ecuación A-38 se deduce que el *ángulo de dispersión*, es proporcional a las cargas eléctricas interaccionantes, pero inversamente proporcional a la energía del proyectil y a su *parámetro de impacto*.

*Nota: Estos análisis sirvieron a E. Rutherford [64] para explicar los extraños resultados de los experimentos de Geiger y Marsden. Cuando estos últimos bombardeaban láminas de diversos materiales con haces de partículas alpha, sorprendentemente algunas de ellas retrocedían. Este fenómeno no podía ser explicado por el modelo atómico actual, el de J. J. Thompson, que suponía que la carga eléctrica estaba distribuida homogéneamente en todo el volumen del átomo. Puesto que para este modelo era muy difícil que una partícula retrocediera, pues la densidad de carga eléctrica no permitía que  $\kappa$  fuese lo suficientemente elevada como para producir el retroceso, tal y como se señala en la ecuación A-38. La densidad necesaria, debiera ser tal, que estuviera toda la carga concentrada en un reducido volumen, el núcleo, y no dispersa homogéneamente por todo el volumen del átomo. Este planteamiento, permitió a E. Rutherford establecer el primer modelo atómico válido, el modelo que lleva su nombre.*

#### A.2.2.6 POTENCIALES INTERATÓMICOS

Hasta ahora, se ha supuesto que la interacción entre proyectil y átomo blanco, era debida a las cargas positivas de sus núcleos, que interaccionaban de forma aislada, ecuación A-12. Pero no se trata de una buena aproximación al problema real, pues no se estaban considerando el efecto de las cargas negativas debidas a los electrones. Aunque al comienzo del presente apartado A.2.2 (pág. 111) se comentó que en este anexo no se iba a tener en consideración el efecto del proyectil sobre los electrones del blanco, no se dijo que no se fuera a tener en cuenta el efecto de los electrones sobre el proyectil, y en particular sobre la modificación de la interacción electrostática entre núcleos.

Los electrones, al tener carga de distinto signo, apantallan, por decirlo de una forma, la *función potencial*<sup>5</sup> existente entre las cargas positivas. Por tanto, tener en cuenta una *función potencial* dada por la ecuación A-16, deja de ser válido.

Debemos entonces, establecer nuevas funciones potenciales para tener en cuenta estos efectos. Lo ideal, sería utilizar una *función potencial* que tuviera en cuenta todas las interacciones debidas a todos los átomos de la red del material con el proyectil, así como su dependencia temporal. Pero este procedimiento se hace inviable, pues se debe tener conocimiento absoluto de toda la red del material, sin tener en cuenta la complejidad de cálculo necesaria al considerar todas y cada una de las partículas. Una opción, sería reducir el volumen de estudio, limitándolo a una pequeña *caja de simulación*, no teniendo entonces en consideración la *función potencial* creada por los átomos fuera de la misma. Este es el objeto de la *dinámica molecular*, que tiene en cuenta la interacción entre todos los átomos de una *caja de simulación* determinada. Se trata de una técnica de simulación muy precisa, pero que debido a su elevado costo computacional, queda reducida su aplicación al estudio de pequeños volúmenes de material y a reducidas energías para los iones incidentes.

Los neutrones de la radiación neutrónica de un reactor de fusión, son de elevada energía, por lo que aunque aún no lo hayamos comentado aún, durante sus primeras interacciones con el material blanco, transfieren elevadas cantidades de energía a los átomos de la red, que a su vez se transforman en iones proyectiles con elevada energía al ser desplazados de su posición; por tanto, la *dinámica molecular* no se ajusta a nuestros requisitos. Una aproximación, que con su posterior análisis estadístico suele resultar bastante válida, sería considerar la interacción aislada entre el proyectil y el átomo blanco más cercano, sin tener en cuenta el efecto de los demás átomos de la red. Esta técnica se conoce como *aproximación de colisiones binarias*, y gracias a que permite estudiar elevadas energías, con una buena aproximación, y a un reducido costo computacional, la elegiremos posteriormente como técnica posterior de simulación.

---

<sup>5</sup>Siempre que nos refiramos a la función potencial,  $\phi$ , nos estaremos refiriendo a la *energía potencial*  $U$ .

Se ha reducido el problema al cálculo aislado de la *función potencial* electrostática entre dos átomos. Entonces, es necesario tener presente la naturaleza de ambos, a fin de poder determinar la distribución de sus cargas eléctricas. Estas distribuciones podrían considerarse esféricas, pero en el centro de cada una de ellas, existiría una partícula puntual de carga positiva, que representaría el núcleo (ley de Gauss). Si se supone que estas distribuciones permanecen estáticas durante la interacción (viola tanto los principios clásicos como cuánticos), se puede aplicar el principio de superposición para las funciones potenciales. Por tanto la *función potencial* entre los dos átomos, se puede descomponer en un compendio de varias funciones potenciales, que según J. F. Ziegler [19] son varias, a saber, a) la *función potencial* debida a la interacción de los núcleos,  $\phi_{nn}$ , b) la *función potencial* debida a las interacciones entre los electrones de ambos átomos,  $\phi_{ee}$ , c) las funciones potenciales debidas a las interacciones de los electrones de un átomo con el núcleo del otro,  $\phi_{ne}$  y  $\phi_{en}$ , d) la *función potencial* debida al incremento de la energía de los electrones de la región de solapamiento de los átomos, para no violar el principio de exclusión de Pauli,  $\phi_k$ , y e) la *función potencial* debida al incremento de energía de intercambio de estos últimos electrones,  $\phi_a$ . Todos ellos se recogen en la ecuación A-39. Este tipo de funciones potenciales, dependientes de la naturaleza de los átomos, se denominan *funciones potenciales específicas*.

$$\phi = \phi_{nn} + \phi_{ee} + \phi_{ne} + \phi_{en} + \phi_k + \phi_a \quad (\text{A-39})$$

Para medir el efecto de apantallamiento de los electrones, se puede dividir la *función potencial*, calculada por la dinámica molecular o la *función potencial específica* (ecuación A-39), entre la *función potencial* puramente electrostática, debida a las cargas nucleares positivas,  $\phi_{nn}$ , ecuación A-16. A esta relación, ecuación A-40, se la conoce como *función de apantallamiento*,  $\Psi$ , e indica que mayor es el efecto del apantallamiento cuanto menor es su valor.

$$\Psi(r) = \frac{\phi(r)}{\phi_{nn}(r)} \leftarrow \phi_{nn}(r) = \frac{z_p z_b}{4\pi\epsilon} \cdot \frac{1}{r} \quad \Psi(r) \leq 1 \quad (\text{A-40})$$

El cálculo de la *función potencial específica* presenta el inconveniente, que en cada momento es necesario conocer en detalle los átomos que están interaccionando, a fin de determinar

sus configuraciones electrónicas. Sería interesante disponer de una *función potencial* general, válida para cualquier tipo de átomo, y que dependiera solamente del valor de sus números atómicos,  $Z_p$  y  $Z_b$ , sin necesidad de más detalles. Estas funciones potenciales se conocen como *funciones potenciales interatómicas universales*.

Conseguir la universalidad para todo tipo de átomos, requiere introducir una variable dependiente de los números atómicos, y que haga adimensional el parámetro de la *función de apantallamiento*. Esta variable se denomina *longitud de apantallamiento*, y su expresión viene dada por la ecuación A-41,  $a_u$ .

$$a_u = \frac{1}{4} \left( \frac{9\pi^2}{2} \right)^{1/3} \underbrace{\left( \frac{4\pi\epsilon_0\hbar^2}{m_e e^2} \cdot 10^{12} \right)}_{a_B} \cdot \frac{1}{Z_p^{1/3} + Z_b^{1/3}} = \frac{0,8853 \cdot a_B}{Z_p^{1/3} + Z_b^{1/3}} \quad (\text{A-41})$$

donde,

$a_u$ , es la longitud de apantallamiento, expresada en picómetros.

$\epsilon_0$ , es la permitividad de vacío, de valor  $8,854\,187\,817\,6 \cdot 10^{-12} \text{ C}/(\text{V}\cdot\text{m})$ .

$\hbar$ , es la constante de Planck reducida, de valor  $1,054\,571\,628 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ .

$m_e$ , es la masa del electrón en reposo, de valor  $9,109\,382\,15 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ .

$e$ , es la carga eléctrica elemental, de valor  $1,602\,564 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ .

$a_B$ , es el radio Bohr, de valor  $5,291\,772\,085\,9 \cdot 10^1 \text{ pm}$ .

$Z_p$ , es el número atómico del proyectil, sin dimensiones.

$Z_b$ , es el número atómico del átomo blanco, sin dimensiones.

La *función potencial interatómica universal*,  $\phi$ , vendría dada entonces por la ecuación A-42.

$$\phi = \frac{z_p z_b}{4\pi\epsilon} \frac{10^{12}}{r} \cdot \Psi(r/a_u) \quad (\text{A-42})$$

donde,

$\phi$ , es la función potencial escalar o energía potencial, expresada en julios.

$r$ , es la distancia entre los núcleos, expresada en picómetros.

Actualmente existen diversos modelos de *funciones de apantallamiento*,  $\Psi$ , ajustadas para diferentes parejas de átomos. Entre las más usados, se encuentran la *función de apantallamiento* de Bohr [65] , ecuación A-43, la de Thomas-Fermi [66] , ecuación A-44, la de

Molière [67], ecuación A-45, la de Lenz-Jensen [68] y [69], ecuación A-46, y la de Ziegler-Biersack-Littmark [19] , ecuación A-47.

$$\Psi_B(r/a_u) = e^{-r/a_u} \quad (\text{A-43})$$

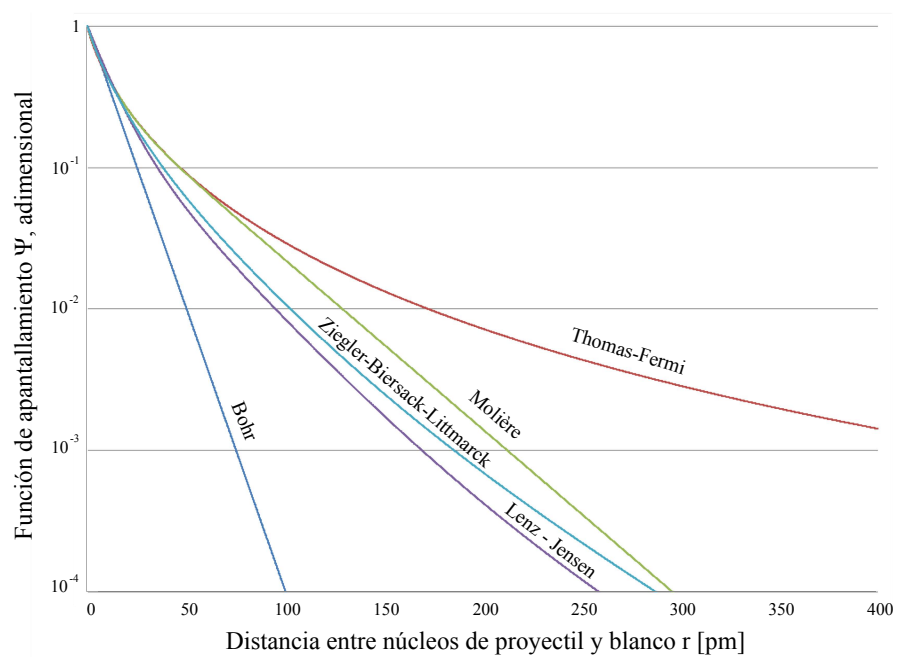
$$\Psi_{TF}(r/a_u) = \left(1 + \left(\frac{r/a_u}{12^{2/3}}\right)^{0,8034}\right)^{-\frac{3}{0,8034}} \quad (\text{A-44})$$

$$\Psi_M(r/a_u) = 0,3500 \cdot e^{-0,3000 \cdot r/a_u} + 0,5500 \cdot e^{-1,2000 \cdot r/a_u} + 0,1000 \cdot e^{-6,0000 \cdot r/a_u} \quad (\text{A-45})$$

$$\Psi_{LJ}(r/a_u) = 0,7466 \cdot e^{-1,0380 \cdot r/a_u} + 0,2433 \cdot e^{-0,3876 \cdot r/a_u} + 0,0102 \cdot e^{-0,2060 \cdot r/a_u} \quad (\text{A-46})$$

$$\begin{aligned} \Psi_{ZBL}(r/a_u) = & 0,1818 \cdot e^{-3,2000 \cdot r/a_u} + 0,5099 \cdot e^{-0,9423 \cdot r/a_u} + 0,2802 \cdot e^{-0,4028 \cdot r/a_u} + \\ & + 0,0282 \cdot e^{-0,2160 \cdot r/a_u} \end{aligned} \quad (\text{A-47})$$

En la figura A.2-8 pueden observarse los valores de la *función de apantallamiento*,  $\Psi$ , según estos modelos, para la interacción de un proyectil de hierro con un átomo de hierro.



*Propiedad de Jesús P. de Vicente, cedida al dominio público.*

**Figura A.2-8:** Funciones de apantallamiento según diversos modelos de potenciales interatómicos universales, para la interacción hierro - hierro.  $a_u = 7,596\,546\,533$  pm.



## A.3 DAÑO POR RADIACIÓN EN EL MATERIAL

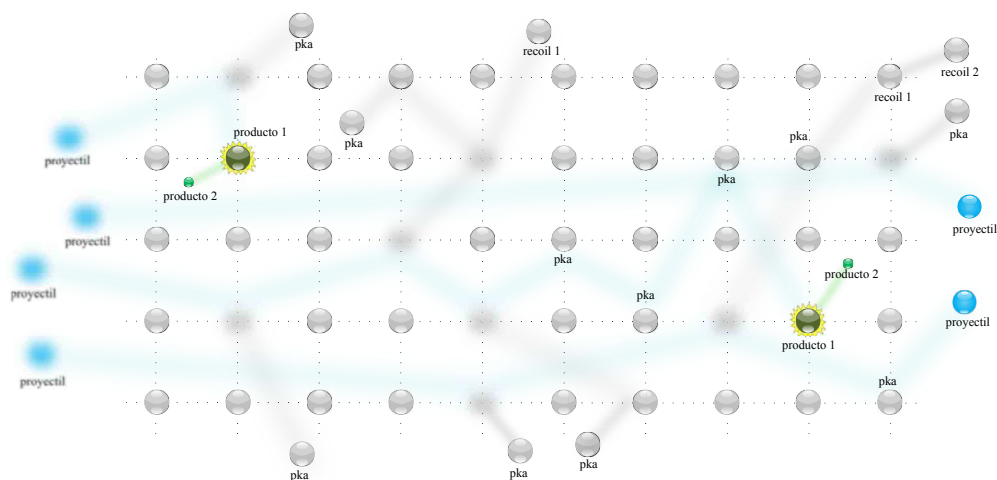
### A.3.1 FENOMENOLOGÍA

#### A.3.1.1 DAÑO PRIMARIO POR RADIACIÓN

Como se comentó al comienzo del capítulo A.2 (pág. 103) , todo proyectil (neutrón o ión) irá interaccionando con los átomos del blanco, cediendo su energía hasta que es tan reducida, que no le permite seguir avanzando y queda implantado en la red del material, o hasta que es capturado en una reacción nuclear, o hasta que atraviesa el espesor del blanco. Esta energía la cede al medio que atraviesa. El neutrón por lo general sólo transfiere la energía a los núcleos del blanco, mientras que los iones también lo hacen a sus electrones. Cuando estos electrones reciben la energía se excitan, pero mientras que en los metales su relajación se produce mediante la disipación de calor, en los dieléctricos puede producir la ionización de sus átomos, causando serios daños en sus propiedades.

En cualquier caso, la energía que un electrón recibe de forma individual no es suficiente como para tener un momento elevado, puesto que su masa es muy pequeña. Motivo por el cual no los consideraremos como posibles partículas causantes de daño a otros átomos. Aunque no debemos olvidar, que la contribución total de los electrones del medio a la pérdida de la energía del proyectil, puede llegar a ser su principal causa.

Entonces, son los núcleos (o los átomos en su conjunto) los que reciben elevadas cantidades de energía de forma individual. El proyectil, a lo largo de toda su trayectoria, cede su energía a los átomos con los que va interaccionando, como puede apreciarse en la figura A.3-1. Estos átomos se conocen como *PKA* (*primary knock-on atom*), y si la energía que reciben,  $T$ , es superior a su *energía de enlace*,  $E_b$  (que les mantiene en una posición de equilibrio dentro de la red), es posible que puedan escapar para convertirse en nuevos «proyectiles» causantes de más daño. El proceso de transferencia de energía del proyectil inicial a todos sus *PKAs* es prácticamente instantáneo, 1 fs [70].



Propiedad de Jesús P. de Vicente, cedida al dominio público.

**Figura A.3-1:** Daño primario en un material blanco producido por una partícula proyectil. Generación de PKAs, de átomos recoils y de reacciones nucleares.

Cuando un PKA recibe una energía,  $T$ , superior a su *energía potencial de enlace* dentro de la red,  $E_b$ , sus enlaces se rompen y queda liberado. Y si la energía con la que emerge,  $T - E_b$ , es superior a la *energía de desplazamiento*,  $E_d$ , entonces escapa de la *zona de recombinación*. Este PKA actúa como un nuevo proyectil, transfiriendo su energía a los demás átomos de la red, denominados recoils. Los recoils pueden a su vez ser desplazados y generar más desplazamientos. El resultado es la disipación de la energía inicial del proyectil en forma de sucesivas *cascadas de desplazamiento*, durante un tiempo aproximado de 100 fs [70].

Si el proyectil es un neutrón o un ión ligero, y su energía es reducida, como ya se ha comentado, aumenta la probabilidad de que su próxima interacción sea una reacción nuclear. Si ésta llegara a producirse, uno de sus productos, el pesado, podría ocupar la posición del átomo transmutado en la red, mientras que el otro, el ligero, podría actuar como proyectil, cuyo destino final sería quedar implantado en la red. El producto de transmutación pesado puede ser cualquiera, según una determinada distribución de probabilidad, dependiente del átomo inicial y de la energía del neutrón. Pero el ligero, según pudimos apreciar en la figura A.2-3 y en la tabla A.2-2, generalmente es  $H$  o  $He$ .

Las *cascadas de desplazamiento*, y los productos de transmutación ligeros, son los causantes del daño primario por radiación, pues cada átomo desplazado origina una *vacante* y un *átomo intersticial* en la red. Por tanto, la red cristalina del material queda dañada. El par vacante-intersticial se le conoce como *par Frenkel*, y el número total de ellos es lo que se conoce como *daño primario*. No obstante, el número total de pares generado por los desplazamientos queda reducido, pues un *átomo intersticial* de baja energía puede ocupar la posición de una vacante, cancelándose el efecto de ambos.

Dependiendo de la estructura cristalina del material, el número de pares puede ser reducido aún más, debido a los fenómenos de «*focusing*» o de «*channeling*». En el primero, la energía del proyectil es transferida según una dirección cristalina de alta densidad atómica, según la cual, un átomo desplazado transfiere su energía al átomo contiguo, que también es desplazado, pero ocupa la vacante que este último deja. Y en el segundo, el proyectil puede recorrer largas distancias a través de canales formados por anillos de átomos, con los que interacciona de forma casi tangencial sin llegar a desplazarlos. En ambos fenómenos, se produce la disipación de la energía del proyectil, pero sin llegar a producir *pares Frenkel*. Pero no proseguiremos en su estudio, pues son fenómenos dependientes de la estructura de la red y de la dirección de la radiación, no siendo el objeto del presente proyecto el estudio detallado del daño, sino la justificación de un método para la emulación del daño neutrónico, como se verá en el ANEXO B (pág. 154) . Proseguiremos el estudio suponiendo que la estructura del material es amorfa.

Dentro del *daño primario* también se debe considerar el causado por los productos de transmutación de las reacciones nucleares. Aunque no lo hayamos comentado antes, estas reacciones nucleares son de captura del proyectil, y posterior relajación del átomo excitado mediante la emisión de una partícula. La probabilidad de fisión nuclear es prácticamente despreciable, por lo que la partícula emitida suele ser ligera, y el átomo relajado transmuta en un átomo de menor, pero similar, número atómico. Entonces, el producto pesado ocupa la posición del átomo trasmutado en la red, mientras que el ligero migra por la red, hasta quedar implantado, es decir, modifica la red. En el futuro, no consideraremos el efecto que tiene, en la modificación de la propiedades (eléctricas, magnéticas, térmicas...) del

material, la sustitución de un átomo por otro transmutado, pues al ser ambos de similar tamaño, las propiedades estructurales prácticamente quedan inalteradas, y son éstas las que nos interesan para la *primera pared* del reactor.

### A.3.1.2 EFECTOS DE LA RADIACIÓN

Algunos de los defectos descritos en el subapartado A.3.1.1 (pág. 130) son química o mecánicamente muy inestables, por lo que son eliminados por reajuste hacia otras configuraciones más estables en una escala de tiempo comprendida entre 10 ps y 1000  $\mu$ s [20].

Los defectos (*pares Frenkel*) que sobreviven, evolucionan en función de la temperatura del material durante un periodo de tiempo que puede comprender hasta meses. Los átomos intersticiales se difunden gradualmente por la red, quedando generalmente atrapados en sus dislocaciones. Pero las vacantes que generan, tienden a acumularse hacia la formación de racimos o «*clusters*», que constituyen huecos, que se manifiestan como hinchamientos. Este fenómeno se conoce como «*swelling*», y no se manifiesta macroscópicamente hasta que se ha alcanzado un umbral de vacantes determinado, momento en el cual aumentará linealmente con la radiación recibida. Además, el «*swelling*» es acrecentado por la acumulación de gas helio, procedente de las reacciones nucleares o del plasma del reactor.

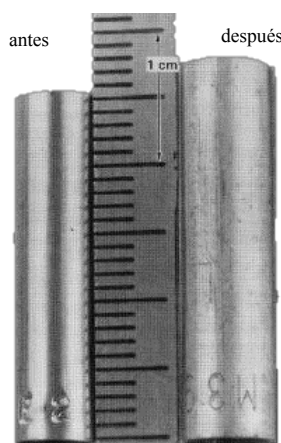
Es por estos motivos que aparecen los *efectos de la radiación*, que se traducen en la modificación de las propiedades de los materiales. En la tabla A.3-1 viene recogida una lista de algunas de propiedades de los materiales que son modificadas debida a los *efectos de la radiación*. En la figura A.3-2 puede verse en una fotografía el efecto macroscópico del «*swelling*». En ella se aprecia como este hinchamiento produce un aumento de la muestra después de someterse a irradiación.

**Tabla A.3-1:** Efectos de la radiación en la modificación de las propiedades materiales.

Efecto de la Radiación	
hinchamiento o « <i>swelling</i> »	modificación de la resistencia eléctrica
modificación de la superconductividad	inestabilidad adimensional
modificación del límite elástico	pérdida de ductilidad
modificación de la tasa de fluencia	modificación del tiempo de vida por fatiga
pérdida de resistencia a fractura	

*Datos tomados F. J. ALONSO [20].*

En esencia, el objeto del presente proyecto es el desarrollo de un sistema, que permita emular el *daño primario* causado por la radiación neutrónica, para que la evolución de los defectos creados, produzca los mismos *efectos de radiación* que en los materiales sometidos a la radiación de un reactor de fusión.



Fotografía tomada de L. K. Mansau [71].

**Figura A.3-2:** Efecto macroscópico del «swelling». Comparativa de un acero inoxidable, antes y después de someterse a la irradiación neutrónica en el reactor EBR – 11.

### A.3.2 MODELO TEÓRICO

En el capítulo A.2 (pág. 103) realizabamos una descripción teórica de la interacción de una partícula con la materia, centrando nuestra atención en la partícula proyectil. Para seguir avanzando, es necesaria su incorporación en un modelo teórico de daño, que tenga en cuenta también los átomos de material blanco.

La *teoría del transporte* [72] y [73], muy utilizada en los cálculos de neutrónica de reactores de fisión nuclear, proporciona una distribución espacial y de velocidades de las partículas en función del tiempo. Para ello hace uso de ecuaciones integro-diferenciales, dependientes de la energía y de la geometría de la interacción, en las que la *densidad de flujo de partículas* se iguala a una serie de términos, que contemplan los diferentes tipos de interacciones que pueden sufrir las partículas, a saber, término difusivo, reacciones nucleares, choques elásticos e inelásticos... El «talón de Aquiles» de esta teoría, es que

es necesario introducir la información de la geometría y de naturaleza del medio dentro de sus ecuaciones, complicándolas lo suficiente como para que la teoría integral (no tan desarrollada como la diferencial) no sea capaz de resolverlas. Se puede proceder realizando diversas aproximaciones, como suponer la homogeneidad del medio, geometría sencilla, partículas monoenergéticas... llegándose a sencillas expresiones analíticas (como por ejemplo los perfiles neutrónicos «senoidales» de los reactores de fisión). Otra forma de proceder es la resolución numérica de las ecuaciones, pero su costo computacional es superior al de la simulación [70].

La técnica de la *simulación* consiste en el lanzamiento virtual de una o varias partículas en un medio atómico, previamente modelizado, y seguir los sucesos que le ocurren a cada una de las partículas. Según el número partículas seguidas y sus interacciones, se distinguen principalmente dos técnicas simulación, a saber, la dinámica molecular y la aproximación de colisiones binarias, ya mencionadas en el subapartado A.2.2.6 (pág. 124). La primera de ellas simula el lanzamiento de un flujo de partículas que interacciona simultáneamente con todos los átomos del medio modelizado y entre sí. Se distingue por una elevada exactitud en los cálculos, pues su modo de proceder se asemeja mucho a la realidad, pero su elevado costo computacional limita su aplicación a reducidos volúmenes de estudio y a un flujo de partículas de baja energía (para que no produzca muchos átomos desplazados). Ya se comentó que para nuestro estudio, necesitamos partículas de elevada energía, por lo que no usaremos esta técnica de simulación.

La técnica de *aproximación de colisiones binarias* sin embargo proporciona buenas estadísticas para los sucesos a altas energías, aunque no reproduce fielmente las interacciones a baja energía, y no tiene en cuenta la evolución térmica de los defectos puntuales. Pero no es un inconveniente para el estudio de nuestro proyecto. Esta técnica consiste en un método iterativo tipo *Monte Carlo*, donde cada iteración consiste en el lanzamiento de una única partícula sobre un medio atómico, no necesariamente muy detallado. Esta partícula va interaccionando binariamente (según alguna de las interacciones descritas en el capítulo A.2 (pág. 103)) con los átomos que encuentra en su trayectoria (subapartado A.2.2.4 (pág. 118)), a diferencia de la *dinámica molecular*, donde se pone en juego la interacción

creada por toda la red. A su vez las partículas desplazadas (*PKAs* y *recoils*) interactúan de la misma forma. Finalmente, un estudio estadístico, para cada iteración y para todas en su conjunto, de los parámetros de interés (número de vacantes e intersticiales, distribución espacial, rango de energías...) proporciona los resultados. Las interacciones de partículas muy energéticas con la materia, realmente pueden considerarse como interacciones binarias, pero no cuando son poco energéticas, pues su reducida velocidad hace que las interacciones cercanas sean apreciables. Este es el motivo por el que el método de *aproximación de colisiones binarias* no es efectivo para bajas energías pero sí para altas.

Entonces, el método *aproximación de colisiones binarias* se ajusta a nuestras necesidades, y será el modelo teórico que usemos para describir el *daño primario* por radiación. En cuanto al modelo de red cristalina a emplear, será el amorfo, como ya se justificó en el subapartado A.3.1.1 (pág. 130) . Haremos una breve descripción de este método, particularizado para materiales amorfos, en el subapartado A.3.2.2 (pág. 139) [19].

Existe una aproximación de la *teoría del transporte* conocida como modelo *Kinchin-Pease* [74], que fue uno de los primeros modelos de daño, y que por su sencillez es ampliamente utilizado. Aunque no usaremos este modelo para nuestros cálculos, si recogeremos los resultados de algunos autores que sí lo han usado. Por lo que debido a su sencillez, y a que ilustra la fenomenología del daño primario, expuesta en el apartado A.3.1 (pág. 130) , haremos una breve descripción en el subapartado A.3.2.1 (pág. 136) .

Debemos comentar, que en nuestro modelo de *aproximación de colisiones binarias* tampoco tendremos en cuenta las interacciones que se producen entre los átomos en movimiento, cuyo efecto puede llegar a ser apreciable cuando la extensión de las cascadas y subcascadas es grande.

#### A.3.2.1 MODELO KINCHIN - PEASE

Supongamos un *PKA* inicial de *energía cinética*  $E$  (no partimos del proyectil inicial, procedente de la radiación, puesto que para el presente análisis es necesario que la partícula proyectil y la partícula blanco sean de la misma naturaleza), que va cediendo su energía

a un medio amorfo (por lo que no se consideran los *efectos de red*, como el «*focusing*» o el «*channeling*»). Despreciaremos las pérdidas energéticas debidas a los electrones del medio, así como también aquellas interacciones donde la identidad de las partículas no se conserve después de la interacción.

El objetivo es calcular la media total de átomos desplazados por un *PKA*, de *energía cinética* inicial  $E$ . Denotaremos este valor por la función objetivo  $\nu(E)$ . Para ello, primero se ha de calcular la *densidad de recoils* [75],  $n(T, E)$ , es decir, el número medio de *recoils*, de energías cinéticas comprendidas entre  $T$  y  $T + dT$ , generados por un *PKA* cualquiera, de energía  $E$ . Con la integración de la *densidad de recoils*,  $n(T, E)$ , en el rango de energía de 0 a  $E$ , y contabilizando al *PKA* como átomo desplazado, obtenemos la función objetivo,  $\nu(E)$ , tal y como puede verse en la ecuación A-48. Estamos suponiendo que todos los *recoils* son desplazados.

$$\nu(E) = 1 + \int_0^E n(T, E) dT \quad (\text{A-48})$$

Con las aproximaciones hechas al principio, la *teoría del transporte* proporciona la expresión A-49 para la *densidad de recoils* [76].

$$\lim_{T/E \rightarrow 0} n(T, E) = \frac{cE}{T^2} \quad 0 \leq c \leq 1 \quad (\text{A-49})$$

donde,

$n(T, E)$ , es la *densidad de recoils*, expresada en *recoils* por *PKA recoil* por julio.

$c$ , es un *parámetro* que depende de la *leyes empleadas para las interacciones*, sin *dimensiones*.

Para que la expresión A-49 sea válida, la energía transferida al *recoil*,  $T$ , debe ser muy pequeña en relación a la energía del *PKA*. Pero podemos suponer que esto sucede sin mucho error, pues la propia expresión A-49, con su cuadrado inverso, nos indica que la mayor parte de *recoils* producidos son de baja energía.

Pero la expresión A-49 no tiene en cuenta si la energía del *recoil* es suficiente, como para no volver a ocupar la *vacante* que generó. Pero puede considerarse, modificando el límite infe-



rior de integración de la ecuación A-48. Un átomo que recibe una energía  $T$ , es desplazado de su posición de equilibrio en la red permanentemente si se cumple la inecuación A-50. Y el *PKA* que le transfirió esa energía, y que ahora tiene una energía  $E - T$ , no ocupará la *vacante* que genera el átomo desplazado si se cumple la inecuación A-51.

$$T - E_b \geq E_d \quad (\text{A-50})$$

donde,

$E_b$ , es la energía de enlace de la posición de equilibrio de un átomo en la red, y es la energía mínima para que el *recoil* escape, pero sin asegurarse no volver a ser atrapado por su *vacante*, expresada en julios por *recoil*.

$E_d$ , es la energía mínima necesaria para que un *recoil* escape de la zona de recombinación, y escape permanentemente de su posición de equilibrio, expresada en julios por *recoil*.

$$E - T \geq E_c \quad (\text{A-51})$$

donde,

$E_c$ , es la energía mínima que debe tener el *PKA* proyectil para no ser atrapado por la *vacante* que dejó el *recoil*, que el mismo generó, expresada en julios por *recoil*.

Si las inecuaciones expresadas en A-50 y A-51 se cumplen, no sólo el *PKA* emerge de la interacción, escapando de la zona de recombinación, sino que el *recoil* generado también lo hace. Definamos entonces el *umbral de multiplicación de cascada*,  $L$ , definido por la ecuación A-52.

$$L = E_b + E_d + E_c \quad (\text{A-52})$$

Entonces si  $E \geq L$ , dos partículas emergen de la interacción, pero si  $E < L$ , solamente lo hace una, que bien puede ser el *recoil*, o bien el propio *PKA*. Por tanto, no nos interesan los *recoils* que tienen una energía,  $T$ , inferior al *umbral de multiplicación de cascada*,  $L$ , pues no van a generar ninguna partícula adicional en sus colisiones, es decir, ningún daño. Entonces tenemos definido el límite de integración que se anticipó anteriormente, e introduciéndolo (ecuación A-52) en la ecuación A-48, tenemos la ecuación A-53.

$$\nu(E) = 1 + \int_L^E n(T, E) dT \quad E \geq L \quad 0 \leq c \leq 1 \quad (\text{A-53})$$

Obviando el límite de la ecuación A-49, como ya se comentó, en introduciéndola en la ecuación A-53, podemos resolver su integral, ecuación A-54. Y así obtenemos en número total de *recoils* generado por un *PKA* de energía,  $E$ .

$$\nu(E) = 1 - c + \frac{cE}{L} \quad E \geq L \quad 0 \leq c \leq 1 \quad (\text{A-54})$$

M. J. Norgett [77] propuso un valor distinto para el *umbral de multiplicación de cascada*,  $L$ , para conseguir una expresión que se ajustara mejor al número real de *recoils* generados. Por lo que habría que sustituir la expresión A-52 por la expresión A-55.

$$L = \frac{2E_d}{\kappa} \quad \kappa \leq 1 \quad (\text{A-55})$$

donde,

$\kappa$ , es la eficiencia del desplazamiento, adimensional.

La utilización de este nuevo umbral se conoce como modelo *Kinchin-Pease modificado* o modelo *NRT*. Y será al que hagamos referencia en el futuro.

### A.3.2.2 SIMULACIÓN POR APROXIMACIÓN DE COLISIONES BINARIAS

Ya se ha comentado que la técnica de simulación por *aproximación de colisiones binarias* es un método *Monte Carlo*, donde cada iteración consiste en el lanzamiento de un proyectil en el seno de una estructura atómica, y termina cuando él y todos los átomos que ha desplazado, no tienen suficiente energía como para continuar avanzando, o bien han escapado de la *caja de simulación*. El análisis estadístico de los datos generados en las iteraciones, constituye el resultado de la simulación.

El proyectil se introduce en la *caja de simulación* en una posición y con una velocidad cualquiera. Entonces, es cuando comienza a perder energía al interactuar con los átomos del medio. Supondremos que esta pérdida de energía puede dividirse en dos fenómenos

independientes, las colisiones elásticas con los núcleos y las colisiones inelásticas con los electrones (no consideraremos las reacciones nucleares). No tendremos en cuenta el daño producido por los electrones que han recibido la energía del proyectil, pues al ser reducidas sus masas, no adquieren suficiente momento cinético como para transferir elevada energía a otras partículas. La interacción elástica se produce con el núcleo que tenga mayor influencia sobre el proyectil, y siempre de forma aislada (colisión binaria). Si el núcleo adquiere una energía superior a su energía de enlace, suponemos que escapa de su posición en la red y comienza a moverse por la red (tanto de él, como de sus electrones). Este átomo desplazado, a su vez también pierde energía de la misma forma que el proyectil inicial, mediante colisiones elásticas e inelásticas, pero siempre sus colisiones elásticas, con los núcleos, serán binarias. Este procedimiento disminuye drásticamente el costo computacional de las simulaciones, pero no siempre en detrimento de la aproximación, pues en algunos casos, se utilizan técnicas para mejorar la rapidez del método sin sacrificar en exceso la exactitud, como por ejemplo en el uso del concepto de *recorrido libre medio*, que veremos más adelante. Todos los átomos en movimiento se detendrán cuando sus energías estén por debajo de una determinada energía umbral. En ese momento, la iteración habrá finalizado, recopilándose los datos de interés, como por ejemplo, la distribución espacial final de las partículas, para obtener el *perfil de implantación*.

Ya hemos justificado anteriormente, el uso de materiales amorfos para el presente proyecto, pues es aceptable para nuestros objetivos. Entonces, recopilando, usaremos una técnica de simulación por *aproximación de colisiones binarias* en materiales amorfos. No es necesario desarrollar un código de simulación para nuestras necesidades, pues ya existe un código desarrollado por J. F. Ziegler y J. P. Biersack [19] que las satisface. A este código se le conoce como *TRIM* (*transport of ions in matter*), y desde sus comienzos, ha sido sucesivas veces validado experimentalmente.

El motivo por el que el código *TRIM* es ampliamente utilizado, es debido a su reducido costo computacional, que se traduce en la rápida obtención de resultados. La clave de su éxito radica en tres aproximaciones, a saber, a) utiliza una aproximación numérica, conocida como *fórmula mágica* (subapartado A.3.2.3 (pág. 141) ), para la obtención de los

*ángulos de dispersión* en las interacciones, y de esta forma evitar la resolución de la ecuación de trayectoria (que podría ser complicada para un potencial interatómico apantallado cualquiera), b) la interacción no se produce con el átomo más influyente, sino con el más cercano que le ocasione una desviación superior a un valor mínimo determinado, aparece de esta forma el concepto de *recorrido libre medio* (subapartado A.3.2.4 (pág. 145) ), y c) las pérdidas electrónicas se modelan mediante el empleo de fórmulas empíricas, obtenidas mediante resultados experimentales (subapartado A.3.2.5 (pág. 147) ).

### A.3.2.3 FÓRMULA MÁGICA DEL CÓDIGO TRIM

Tengamos en cuenta la ecuación de la trayectoria del proyectil durante una interacción, vista desde un sistema de referencia fijo al átomo blanco, ecuación A-27. Podemos generalizar esta trayectoria para cualquier tipo de interacción, sin más que sustituir la *función potencial* columbiana  $\kappa/r$  por una *función potencial* interatómica cualquiera,  $\phi$ , como por ejemplo las indicadas en el subapartado A.2.2.6 (pág. 124) . El código *TRIM* utiliza una *función potencial* desarrollada por sus mismos autores, la *función potencial* de Ziegler-Biersack-Littmark [19],  $\phi_{ZBL}$ , ecuación A-47.

Por otro lado, el *momento angular* podemos expresarlo como  $|\vec{L}| = pm |\vec{u}_p|$ , y además al ser la interacción binaria, la *energía potencial* inicial del proyectil es nula, ya que se supone que viene desde en infinito, entonces toda su energía es cinética inicial:  $E = \frac{1}{2}mu_p^2$ . Ya se demostró que el *momento angular* (subapartado A.2.2.1 (pág. 113) ) y la *energía total* (subapartado A.2.2.2 (pág. 116) ) del proyectil permanecen siempre constantes, por estar bajo la influencia de fuerzas centrales y conservativas. Por tanto, la ecuación de la trayectoria A-27 podemos generalizarla con la ecuación A-56.

$$\varphi = \int_s \frac{1}{r^2} \sqrt{\frac{mp^2}{1 - \frac{p^2}{r^2} - \frac{\phi_{ZBL}}{E}}} \cdot dr \quad (A-56)$$

El código de simulación se vería ralentizado por tener que resolver la integral de la ecuación A-56 para cada interacción, por lo que *TRIM* utiliza una aproximación para esta

ecuación, conocida como *fórmula mágica*. A continuación haremos una breve exposición de como obtener la *fórmula mágica*, pero sin entrar en detalle.

Trasladaremos nuestro sistema de referencia fijo a la partícula blanco al centro de masas de las dos partículas. La interacción vista desde este nuevo sistema de referencia, puede representarse por la figura A.3-3. En esta figura, puede apreciarse como las trayectorias de las partícula proyectil y blanco son simétricas, por lo que el ángulo formado por sus asíntotas, denominado *ángulo de dispersión*,  $\chi$ , es idéntico. La relación de este *ángulo de dispersión* del sistema centro de masas,  $\chi$ , se relaciona con el del sistema fijo,  $\varphi$ , que hemos venido usando hasta ahora, por la expresión A-57 [65] . También se puede observar el *parámetro de impacto*,  $p$ , los *radios de curvatura* en los puntos de máxima aproximación ( $r_o$ ) de las partículas (ápsides),  $\rho_p$  y  $\rho_b$ , y unos *términos de ajuste*,  $\delta_p$  y  $\delta_b$ , que serán en los que se realizará la aproximación ya comentada.

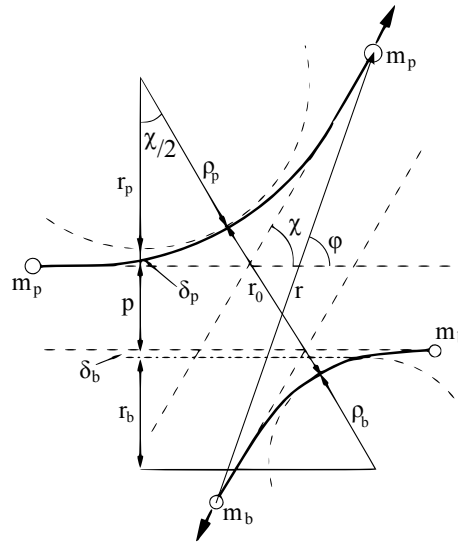


Figura propiedad de J. F. Ziegler [19]. Modificada por Jesús P. de Vicente.

**Figura A.3-3:** Trayectorias de dos partículas que interactúan, desde un sistema centro de masas.

$$\tan \varphi = \frac{m_b \sin \chi}{m_p + m_b \cos \chi} \quad (\text{A-57})$$

En la figura A.3-3, aparece el denominado *triángulo de dispersión*, según el cual puede calcularse el *ángulo de dispersión* del sistema centro de masas,  $\chi$ , en función de los parámetros geométricos que definen la interacción en el punto de máximo acercamiento de las partículas, según lo indicado por la ecuación A-58.

$$\cos \frac{\chi}{2} = \frac{\rho_p + \rho_b + \delta_p + \delta_b + p}{\rho_p + \rho_b + r_o} \quad (\text{A-58})$$

Pasemos a analizar por separado los parámetros de esta ecuación A-58. El *parámetro de impacto*,  $p$ , depende de la geometría inicial de las partículas, es decir, de la dirección de la velocidad inicial del proyectil y de la posición de la partícula blanco. En cuanto a la distancia mínima de aproximación de las partículas,  $r_o$ , puede calcularse hallando el mínimo de la ecuación A-56, pues en realidad se trata del vector de posición,  $r$ , del sistema de referencia fijo al blanco. Por tanto, se obtiene resolviendo la ecuación A-59 mediante algún método numérico, deprecando la solución trivial  $r_o = 0$ .

$$1 - \frac{p^2}{r_o^2} - \frac{\phi_{\text{ZBL}}(r_o)}{E} = 0 \quad (\text{A-59})$$

El análisis matemático desarrollado por D. E. Harrison [78] permite obtener la suma de los *radios de curvatura*,  $\rho$ , mediante la ecuación A-60. Para ello analizó las interacciones entre partículas teniendo en cuenta el equilibrio entre las fuerzas interatómicas y las fuerzas centrífugas.

$$\rho = \rho_p + \rho_b = \frac{2 \left( E / \left( 1 + \frac{m_p}{m_b} \right) - \phi(r_o) \right)}{-\frac{\partial \phi}{\partial r}(r_o)} \quad (\text{A-60})$$

La suma de los *términos de ajuste*,  $\delta$ , puede obtenerse de estudios en los que participó J. P. Biersack, uno de los creadores del código TRIM, [79] y [80], ecuación A-61.

Ya tenemos definidos todos los parámetros para la resolución del *ángulo de dispersión*,  $\chi$ , A-58. Pero sería interesante generalizarla para cualquier combinación de átomos que interaccionen, para ello procedemos a adimensionalizar sus parámetros, mediante la división

$$\delta = \delta_p + \delta_b = \underbrace{2(1 + C_1 \epsilon^{1/2}) \epsilon \left(\frac{p}{a}\right)^{\frac{C_2 + \epsilon^{1/2}}{C_3 + \epsilon^{1/2}}}}_A \left( \frac{r_o - p}{1 + \frac{C_4 + \epsilon}{C_5 + \epsilon} \frac{1}{-A + \sqrt{1 + A^2}}} \right) \quad (\text{A-61})$$

donde,

$\delta$ , es el término de ajuste de la trayectoria, expresado en picómetros.

$a$ , es la longitud de apantallamiento universal, ecuación A-62 [81], ligeramente diferente a la que usamos en la ecuación A-41, expresada en picómetros.

$p$ , es el parámetro de impacto, expresado en picómetros.

$r_o$ , es la distancia mínima de las partículas es la interacción, expresada en picómetros.

$A$ , es un parámetro definido en la propia expresión, sin dimensiones.

$\epsilon$ , es la energía reducida, expresada en la ecuación A-63, sin dimensiones.

$C_1 \dots C_5$ , son las constantes de ajuste, obtenidas mediante la comparación con los cálculos detallados, según la función potencial usada. Para el caso de la función potencial ZBL, los valores son  $C_1 = 0,992\,29$ ,  $C_2 = 0,011\,615$ ,  $C_3 = 0,007\,122$ ,  $C_4 = 14,813$ ,  $C_5 = 9,3066$ , sin dimensiones.

$$a = \frac{0,8853 \cdot a_B}{Z_p^{2/3} + Z_b^{2/3}} \quad (\text{A-62})$$

donde,

$a$ , es la longitud de apantallamiento universal, expresada en picómetros.

$a_B$ , es el radio Bohr, de valor  $5,291\,772\,085\,9 \cdot 10^1$  pm.

$Z_p$ , es el número atómico del proyectil, sin dimensiones.

$Z_b$ , es el número atómico del átomo blanco, sin dimensiones.

$$\epsilon = \frac{aE / \left(1 + \frac{m_p}{m_b}\right)}{Z_p Z_b e^2} \quad (\text{A-63})$$

donde,

$\epsilon$ , es la energía reducida, sin dimensiones.

$a$ , es la longitud de apantallamiento universal, expresada en picómetros.

$E$ , es la energía del proyectil, expresada en julios.

$e$ , es la carga eléctrica elemental, de valor  $1,602\,564 \cdot 10^{-19}$  C.

$Z_p$ , es el número atómico del proyectil, sin dimensiones.

$Z_b$ , es el número atómico del átomo blanco, sin dimensiones.

por la longitud de apantallamiento universal,  $a$ , obteniéndose la ecuación A-64. Esta ecuación es la fórmula mágica que usa el nuestro código TRIM para la resolución de la interacción de dos partículas.

$$\cos \frac{\chi}{2} = \frac{P + R_c + \Delta}{R_o + R_c} \quad (\text{A-64})$$

donde,

$P$ , corresponde a la adimensionalización del parámetro de impacto,  $p/a$ , sin dimensiones.

$R_o$ , corresponde a la adimensionalización de la distancia mínima entre partículas,  $r_o/a$ , sin dimensiones.

$R_c$ , corresponde a la adimensionalización de la suma de los radios de curvatura,  $\rho/a$ , sin dimensiones.

$\Delta$ , corresponde a la adimensionalización de la suma de los parámetros de ajuste,  $\delta/a$ , sin dimensiones.

Pero para energías muy elevadas (nuestro caso en el presente proyecto), se puede suponer despreciable el efecto del apantallamiento de los electrones (subapartado A.2.2.6 (pág. 124) ), y utilizar un potencial puramente columbiano es una buena aproximación. Para estos casos, el código TRIM utiliza el desarrollo que hicimos en el apartado A.2.2 (pág. 111) , donde para el ángulo de dispersión obtuvimos la ecuación A-38.

#### A.3.2.4 RECORRIDO LIBRE MEDIO DEL CÓDIGO TRIM

La energía transferida al átomo blanco por el proyectil es la dada por la ecuación A-65. En esta ecuación se deduce que cuanto mayor es el *ángulo de dispersión*,  $\chi$ , que experimentan las partículas, mayor es la energía transferida,  $T$ . Por otro lado, la *fórmula mágica*, ecuación A-64, nos indica que este *ángulo de dispersión*,  $\chi$ , es tanto mayor cuanto menor sea el *parámetro de impacto*,  $p$ . Entonces, cuanto menor sea *parámetro de impacto*,  $p$ , mayor será la transferencia de energía,  $T$ . Esto es interesante, puesto que en las interacciones con elevado *parámetro de impacto*, la transferencia de energía es tan reducida, que no es capaz de desplazar al átomo blanco de su posición de equilibrio, no produciendo daño. Evitar simular estas interacciones, se traduce en una reducción del costo computacional. Este es el objetivo del concepto de *recorrido libre medio* de TRIM.

$$T = \frac{4m_p m_b}{(m_p + m_b)} E \sin^2 \frac{\chi}{2} \quad (\text{A-65})$$



El *recorrido libre medio*,  $L$ , es la distancia media que recorrería un proyectil sin tener una interacción apreciable (según lo expuesto en el párrafo anterior). Esta distancia va actualizándose en cada interacción, puesto que depende de la energía del proyectil, que evidentemente va disminuyendo. Una vez el proyectil ha recorrido esta distancia, el propio código genera de forma aleatoria un átomo blanco, de *parámetro de impacto* dado por la ecuación A-66, para que colisionen. Aunque el material se considere amorfo, en el cálculo del *recorrido libre medio* debe ser tomada en cuenta su densidad media. Cálculos probabilísticos realizados por J. F. Ziegler [19], y suponiendo ignoradas aquellas interacciones que no desvíen al proyectil más de cinco grados sexagesimales, nos llevan a la expresión usada por TRIM para el *recorrido libre medio*,  $L$ , ecuación A-67.

$$p = \sqrt{-\frac{\ln R_n}{\pi N L}} \quad (\text{A-66})$$

donde,

$R_n$ , es un número aleatorio generado por el propio código, comprendido entre 0 y 1, sin dimensiones.

$$L = \frac{0,02 (1 + m_p + m_b)^2 \epsilon^2 + 0,1 \epsilon^{1,38}}{4 \pi a^2 N \ln (1 + \epsilon)} \quad (\text{A-67})$$

donde,

$N$ , es la densidad atómica, expresada en átomos por picómetro cúbico.

Sin embargo, cuando la energía del proyectil es muy reducida, la ecuación A-67 nos daría un *recorrido libre medio* muy pequeño, que podría llegar a ser inferior a la distancia interatómica. Esto haría que los resultados fueren erróneos, pues el código supondría la existencia de átomos donde no es posible su existencia, además elevaría el costo computacional; contradictorio al objetivo del *recorrido libre medio*. Para estos casos, TRIM utiliza unos valores para el *parámetro de impacto* y para el *recorrido libre medio*, dados por las ecuaciones A-68 y A-69, respectivamente.

$$p = \sqrt{\frac{R_n}{\pi N^{2/3}}} \quad (\text{A-68})$$

$$L = N^{-1/3} \quad (\text{A-69})$$

### A.3.2.5 PÉRDIDAS ELECTRÓNICAS EN EL CÓDIGO TRIM

La reducida masa de los electrones (reducido momento), se vuelva a comentar, que no les permite producir desplazamientos atómicos, pero si frenar al proyectil. *TRIM* utiliza la fórmula empírica propuesta por O. S. Oen y M. T. Robinson [82] , ecuación A-70. Es interesante apreciar la dependencia del frenado electrónico, ecuación A-70, con la energía del átomo en movimiento.

$$\Delta E_e = \frac{0,045 \cdot e^{-0,3 \cdot r_0/a}}{\pi a^2} \cdot k \sqrt{E} \quad (\text{A-70})$$

donde,

$\Delta E_e$ , es la pérdida de energía del proyectil por frenado electrónico, por interacción.

$k$ , es un coeficiente empírico dado por la ecuación A-71.

$$k = \frac{1,216\,007 \cdot Z_p^{7/6} Z_b}{\left(Z_p^{2/3} + Z_b^{2/3}\right)^{3/2} m_p^{1/2}} \quad (\text{A-71})$$

## A.4 DAÑO PRIMARIO EN REACTOR DE FUSIÓN

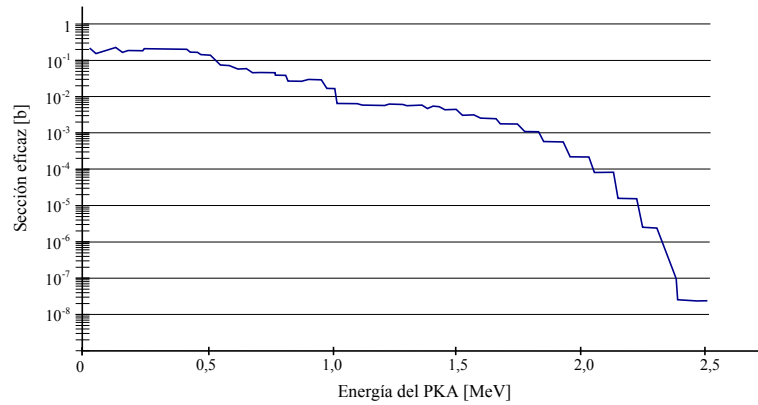
En el subapartado A.3.1.1 (pág. 130) introdujimos el concepto de *PKA*, como aquellos átomos de la red que reciben directamente la energía de los proyectiles de la radiación, que en el caso de los reactores de fusión son los neutrones. Estos *PKA*, a su vez transfieren su energía a otros átomos del material, denominados *recoils*, y así sucesivamente con la formación de cascadas y subcascadas. Entenderemos pues, por *daño primario*, a los pares vacante-intersticial (pares *Frenkel*) formados en el material, debido a su interacción con los neutrones, así como también a los productos de transmutación formados, que en el subapartado A.2.1.2 (pág. 109) vimos que principalmente eran hidrógeno y helio. No consideraremos la evolución de la microestructura producida por este daño primario, responsable de la modificación de las propiedades macroscópicas del material, pues se trata del objetivo final del sistema propuesto en el presente proyecto. Además, las técnicas de simulación actuales sólo permiten el estudio detallado de la evolución de la microestructura para volúmenes muy pequeños de material, siendo por tanto difícil su extrapolación a las propiedades macroscópicas como por ejemplo M. T. Robinson comenta para el caso de la *dinámica molecular* [70], las más precisa de todas las técnicas.

Por tanto, el conocimiento del espectro de *PKA* en un reactor de fusión, es un punto de partida fundamental para el cálculo del *daño primario*, que posteriormente se traducirá en la modificación de las propiedades mecánicas, que son las que principalmente nos interesan para el estudio de la *primera pared*, [83]. En la figura A.4-1 mostramos el espectro de *PKA* calculado por S. P. Simakov [54] modificado (el autor lo calculaba por unidad de energía), usando para ello el código *MCNP5*<sup>6</sup>. Este espectro es el generado por el *flujo neutrónico* que mostrábamos en la figura A.1-2 en la *primera pared*. En la figura se puede

---

<sup>6</sup>Código de simulación neutrónica tipo *Monte Carlo*, que utiliza diferentes librerías nucleares para la interacción de los neutrones con la materia.

apreciar que el *PKA* de máxima energía generado es 2,5 MeV con una probabilidad razonable.



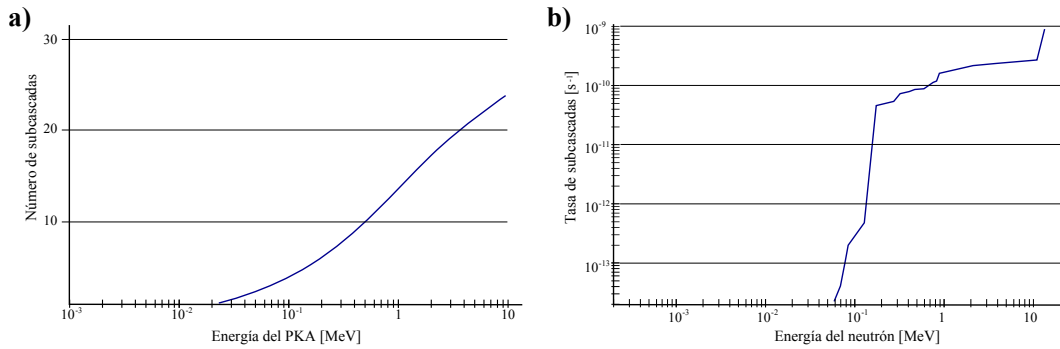
Datos tomados de S. P. Simakov [54].

**Figura A.4-1:** Espectro de producción de PKA por flujo neutrónico en la primera pared.

Los *PKA* producidos por la radiación neutrónica, producirá cascadas de átomos desplazados. Un modelo analítico, desarrollado por A. I. Ryazanov [84], permite la obtención del número de subcascadas generadas en función de la energía del *PKA*. Los resultados pueden observarse en la figura A.4-2 a), particularizados para el hierro. Por tanto, teniendo en cuenta el espectro neutrónico del futuro prototipo *DEMO* (figura A.1-2), su espectro de *PKA* en una *primera pared* de hierro (figura A.4-1) y el número de subcascadas producidas en función de la energía del *PKA* (figura A.4-2 a)), puede obtenerse la tasa de generación de subcascadas en la primera pared de *DEMO*, figura A.4-2 b).

En cuanto al cálculo de los átomos desplazados,  $\nu$ , por un *PKA* de energía  $E$ , podemos usar el modelo *NRT*<sup>7</sup> (final del subapartado A.3.2.1 (pág. 136)), concretamente el uso de las ecuaciones A-54 y A-55. Para la *eficiencia de desplazamiento*,  $\kappa$ , podemos usar la propuesta por P. Sigmund [85], de valor  $\kappa = 0,8$ . Para la *energía de desplazamiento*,  $E_d$ , que en el hierro es anisótropa, es aconsejable el uso de un valor medio, pues el modelo *NRT* no permite

<sup>7</sup>Debemos recordar que este modelo no tiene en cuenta la pérdida de energía que sufre el *PKA* debido a los electrones del medio.



Datos tomados de Ryazanov [84].

**Figura A.4-2:** a) Número de subcascadas en función de la energía del PKA, b) tasa de producción de subcascadas en primera pared de DEMO.

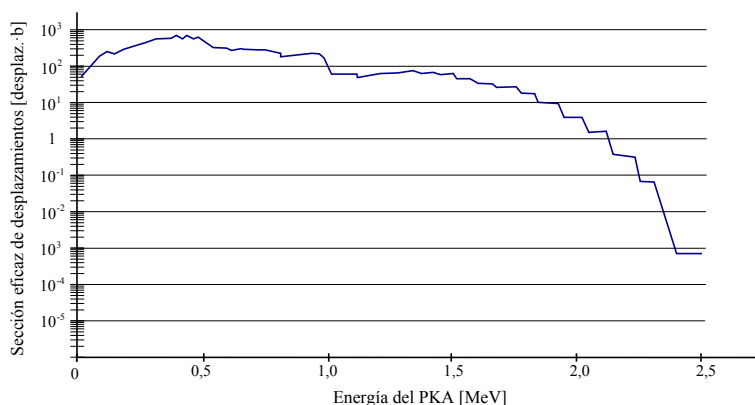
la distinción de las direcciones espaciales. Estudios realizados por K. Nordlund *et al* [86] sobre la *energía de desplazamiento* en el hierro, aconseja el uso de 40 eV en el modelo *NRT*, así como también lo aconseja la norma ASTM E 521 96 [10]. Tomando estos valores, y con la suposición de interacción de esferas rígidas ( $c = 1$ ), el cálculo del número de desplazamientos,  $\nu$ , por cada *PKA* de energía  $E$ , viene dado por la ecuación A-72.

$$\nu(E) = \frac{0,8 \cdot 10^6 \cdot E}{2 \cdot 40} = 10\,000 \cdot E \quad (\text{A-72})$$

donde,

$E$ , es la energía del *PKA*, en megaelectronvoltios.

Multiplicando el número de desplazamientos producido por la ecuación A-72 por el espectro de *PKA* (figura A.4-1) para cada uno de los intervalos de energía, obtenemos la figura A.4-3, donde se muestra el espectro de desplazamientos, producido por el *flujo neutrónico*, es decir, la sección eficaz de producción de defecto en función de la energía del *PKA*. Integrando la curva de esta figura, y multiplicando el resultado por el *flujo neutrónico* (usaremos el flujo del modelo C de la tabla A.1-2,  $11,4 \cdot 10^{14}$  neutrones/cm<sup>2</sup>/s, pues es el usado por S. P. Simakov en sus estudios [54]), tenemos la tasa de generación de desplazamientos de átomos en el material por cada átomo de su red (teniendo en cuenta que 1 b equivale a  $10^{-24}$ cm<sup>2</sup>).



Propiedad de Jesús P. de Vicente, cedida al dominio público.

**Figura A.4-3:** Espectro de desplazamientos en la primera pared debido al flujo neutrónico.

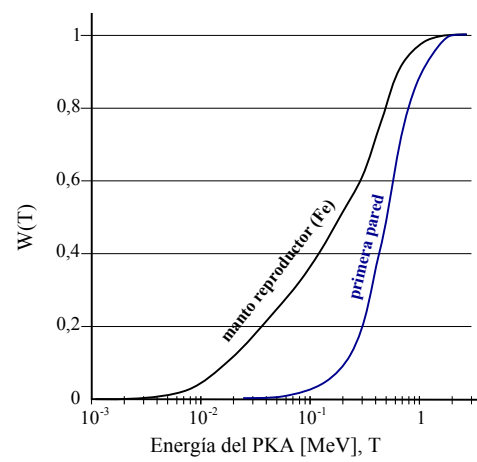
La relación entre el número de átomos desplazados y los átomos de la red<sup>8</sup>, se conoce como *dpa*. Se trata de una unidad muy usada en los estudios de *daño primario* por radiación, y en nuestro caso, tenemos  $4,418 \cdot 10^{-7} \text{ dpa/s}$ , que suponiendo un *factor de funcionamiento anual* del 100 % del reactor, corresponden a 13,93 dpa/año. Este valor anual es diferente con los calculados por otros estudios, como por ejemplo el realizado por S. P. Simakov [54] (6,7 dpa), puesto que aunque las condiciones iniciales de *flujo neutrónico* sean las mismas y la composición de la *primera pared* varíe ligeramente, nuestros cálculos con el modelo *NRT* no consideran la recombinación de átomos desplazados hacia posiciones estables de la red, ni durante las últimas fases de las subcascadas y ni durante la relajación térmica, que pueden llegar a dejar un ratio del 32 % de supervivencia de átomos desplazados en la *primera pared*, según C. H. M. Broeders [87], y del 33 % según S. P. Simakov [54], usando la *dinámica molecular*.

La medida *dpa* no es un parámetro que defina completamente el *daño primario*, pues solamente tiene en cuenta el número total de desplazamientos producidos por cada átomo de la red. Por lo que por ejemplo, un *PKA* muy energético podría producir, en un mismo volumen, la misma cantidad de desplazamientos que varios *PKA* de menor energía. Pero la distribución espacial de estos desplazamientos sería completamente diferente, puesto que

<sup>8</sup>Esta relación puede ser superior a la unidad, puesto que un átomo puede ser desplazado varias veces.

como se puede observar en la figura A.4-2 a), los *PKA* de alta energía producen desplazamientos a través de un elevado número de subcascadas, mientras que lo de baja energía, lo hacen a través de pares vacante-intersticial aislados [88].

Se hace necesaria entonces la utilización de un nuevo parámetro para la medida del daño primario. Una propuesta puede ser la utilización de una *distribución de probabilidad*  $W(T)$  [89], es decir, una función acumulativa del daño. Entonces, cada punto de esta distribución,  $W(T)$ , representaría la proporción de *dpa* respecto al total, producidos por todos los *PKA* de energía menor que  $T$ . Para su cálculo, simplemente tendríamos que integrar la *sección eficaz de desplazamiento*, figura A.4-3, entre 0 y  $T$ , y dividir el resultado entre el número total de *dpa* [90]. Esta función se conoce como *función de daño*, y hemos dicho que es una *distribución de probabilidad*, pues cuando  $T \rightarrow 0 : W(T) \rightarrow 0$  y cuando  $T \rightarrow \infty : W(T) \rightarrow 1$ . En la figura A.4-4 podemos observar la *función de daño* producida por el flujo neutrónico en la *primera pared*, así como también la *función de daño* en el hierro del *manto reproductor* de DEMO. La diferencia entre ambas funciones, a parte de la geometría y los materiales, es debida a que el flujo neutrónico que llega al manto, ya ha depositado parte de su energía en la *primera pared*, por lo que la contribución de los *PKA* de baja energía es mayor en el manto. Esta función, será la que usemos para ajustar el *daño primario* producido por los iones pesados, al producido por el *flujo neutrónico*.



*Propiedad de Jesús P. de Vicente, cedida al dominio público, con algunos datos tomados de P. Vladimirov [88].*

**Figura A.4-4:** Funciones de daño en la primera pared (elaborada por Jesús P. de Vicente) y en el manto reproductor de DEMO (tomada de P. Vladimirov [88]).



ANEXO B

## **EMULACIÓN DE DAÑO CON IONES PESADOS**

## B.1 MOTIVACIÓN PARA EMULAR

En el ANEXO A, se establece que los *efectos de la radiación* (subapartado A.3.1.2 (pág. 133) ) en los materiales, originados por el *daño primario* (subapartado A.3.1.1 (pág. 130) ), producirán la modificación en sus propiedades. En nuestro caso, serán de especial interés los cambios dimensionales, pues se traducirían en una acumulación de tensiones que podrían producir fracturas en la *primera pared*.

Es necesario entonces el desarrollo de nuevos materiales, resistentes a las condiciones extremas de radiación, ya expuestas en el apartado A.1.1 (pág. 97) . Razones económicas evidentes, y de seguridad, hacen necesario el ensayo de estos materiales bajo las mismas condiciones de radiación, previo a sus incorporaciones en el diseño de un primer prototipo de reactor comercial [91].

Llegados a este punto, la solución pasaría por someter el material de estudio a la misma radiación. El problema surge cuando hay que generar esa radiación, pues actualmente no existe en el mundo, ninguna instalación capaz de ello. Es cierto, que existen reactores de fusión experimentales, capaces de generar el mismo espectro neutrónico, pero no producen un flujo de partículas equivalente a un futuro reactor comercial [91], pues sus tasas de reacciones nucleares no son muy elevadas, ya que sus objetivos no son buscar la rentabilidad energética (objetivo de *ITER* [92]), sino la propia investigación. Por otro lado, si que existen fuentes neutrónicas de flujos equivalentes, como por ejemplo en los *reactores rápido reproductores de fisión*, pero sus espectros neutrónicos no alcanzan los característicos 14 MeV de la fusión del deuterio y del tritio [91].

Tener una instalación que genere el mismo flujo y espectro, esperados para un reactor comercial de fusión, realmente tampoco es una solución viable para estudiar los *efectos de la radiación* en los materiales. Pues necesitaríamos irradiar el material durante el mismo tiempo que el tiempo de vida de operación del reactor, no siendo entonces viable desde el punto de vista económico. Entonces, el desarrollo de materiales que mantengan sus

especificaciones a lo largo de toda la vida de operación necesitan de fuentes neutrónicas de mayor flujo aún. Se está desarrollando una instalación, *IFMIF* [93], que cumple estos requisitos, pero su elevada complejidad tecnológica no le permite estar disponible antes de 2017, siendo casi su desarrollo paralelo al de *ITER* [94].

Sería interesante la propuesta de sistemas alternativos, previos a la puesta en operación de *IFMIF*, que permitan avanzar en el conocimiento de estos *efectos de la radiación* y en el desarrollo de los materiales candidatos para un primer reactor comercial. En la MEMORIA del presente proyecto se exponen las ventajas e inconvenientes de las principales alternativas, a saber, a) simulación computacional, b) irradiación con protones, c) irradiación con iones ligeros, y d) irradiación con iones pesados. También se procede a la selección de una de ellas, resultando la emulación con iones pesados la elegida.

## B.2 ANÁLISIS GENERAL DE DAÑO

En este capítulo intentaremos analizar de forma general producción de *daño primario* producida en los materiales sometidos a radiación, exponiendo las diferencias fundamentales entre radiación neutrónica e iónica.

### B.2.1 ENERGÍA DISPONIBLE PARA PRODUCIR DAÑO

Una gran diferencia entre la radiación neutrónica y la iónica (para altas energías, por encima de 1 MeV), es la interacción con los electrones del medio. Mientras que la interacción de la neutrónica con estos electrones es prácticamente despreciable, es de extrema importancia en el caso de la iónica. Se puede poner el ejemplo de una radiación iónica de hierro, con energía inicial de 400 MeV por ión, penetrando un material puro, también de hierro, y al que transfiere el 99,44 % de su energía a los electrones. Estas pérdidas energéticas (consideradas pérdidas pues no se aprovechan para la producción de *daño primario*), se les denomina *pérdidas por ionización*, puesto que pueden llegar incluso a ionizar a los átomos de material irradiado.

Desde un punto de vista fenomenológico, el fenómeno de las *pérdidas por ionización* es debida a la pérdida parcial del efecto apantallado de los electrones de los proyectiles que viajan a elevada velocidad. Según Bohr [65], puede despreciarse el efecto de apantallamiento de aquellos electrones, cuya velocidad orbital es inferior a la velocidad relativa de su átomo en un medio. Por este motivo, la carga positiva del núcleo del proyectil no es totalmente apantallada, pudiendo presentar (con seguridad si inicialmente el proyectil era un átomo neutro o un catión) una carga efectiva positiva, que se incrementa con la velocidad. En el subapartado A.2.2.6 (pág. 124) se comenta el efecto del apantallamiento de los electrones de los átomos del medio, que hacen que en la lejanía, la carga efectiva de los átomos pueda considerarse negativa. *Grosso modo*, tendríamos una partícula positiva viajando por un medio de campos eléctricos negativos (atractivos entonces), cuyo efecto

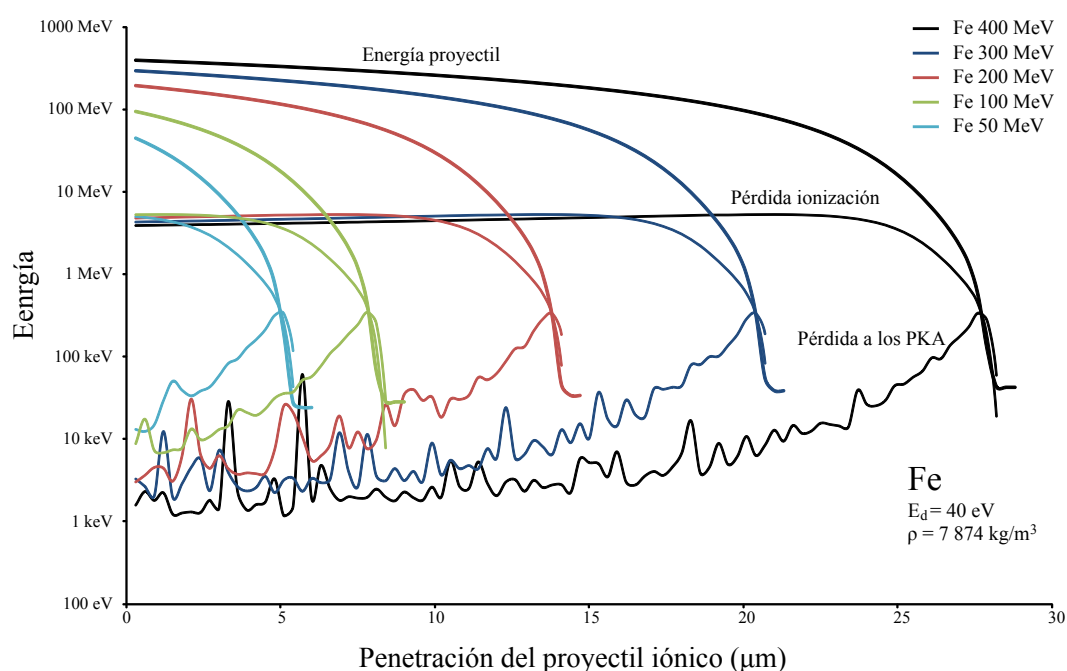
neto sería la transformación de su *energía cinética* en *energía potencial*, pero que por la *ley de acción reacción*, los electrones del medio transformarían su *energía potencial* en *energía cinética* (*pérdidas por ionización*). Todo esto ocurre hasta que la velocidad del proyectil es tan reducida, que puede comenzar a considerarse importante la interacción repulsiva entre los núcleos, del proyectil y del átomo blanco, pues la solapación de los orbitales electrónicos de ambos dura el suficiente tiempo como para que este efecto, ya no apantallado, sea apreciable. Se producen entonces las colisiones entre núcleos, donde el núcleo proyectil transfiere energía al núcleo del medio, lo que permite la formación de los *PKA*, causantes del *daño primario*.

Resumiendo, las *pérdidas por ionización* reducen la cantidad de energía que el proyectil dispone para producir *PKA*, es decir, átomos desplazados, que a su vez podrán desplazar a otros, y así sucesivamente, puesto que los electrones (receptores de casi la totalidad de la energía del proyectil) no pueden desplazar a los átomos del medio debido a sus reducidas masas, y no pueden transportar elevada cantidad de movimiento entonces. No obstante, el estudio de estos últimos debe ser tenido en consideración, pues la posible modificación de la configuración electrónica de los átomos, debida a la posible promoción de los electrones hacia orbitales de mayor energía, puede producir importantes cambios en las propiedades de los dieléctricos, así como también transferencia de energía por medio de calor en los metales cuando los electrones saltan a la *banda de conducción*. En este último caso, que es el que nos interesa, el calor puede llegar a producir daño macroscópico si no es adecuadamente refrigerado el material.

En la figura B.2-1 se han representado las historias energéticas de varios proyectiles iónicos de hierro, con diferentes energías iniciales, atravesando un medio homogéneo de hierro. Los cálculos de esta figura han sido realizados con el código *TRIM* (subapartado A.3.2.3 (pág. 141) y siguientes), con lanzamientos de 1000 iones sobre un blanco de hierro de *energía de desplazamiento*,  $E_d$ , igual a 40 eV [10]. Para todos los casos puede apreciarse como inicialmente la energía es perdida fundamentalmente por ionización, y además de forma constante. Pero en torno a los 5 MeV las *pérdidas por ionización* comienzan a descender, en detrimento de un aumento de la energía transferida a los núcleos atómicos, hasta que

la energía del proyectil cae hasta unos pocos cientos de kiloelectronvolts, que es cuando comienzan a igualarse la pérdidas por ionización y la energía transferida a los núcleos, pero la energía del proyectil es ya tan reducida que aumenta la probabilidad de que quede en ese momento implantado en el material.

En esta figura, se aprecia una clara equivalencia en las cinco energías simuladas, pues apenas la única diferencia es una traslación de las curvas, debida a los diferentes rangos de penetración de los proyectiles. Solamente cuando las energías de los proyectiles son tan reducidas, que casi son inminentes sus implantaciones a la red del material (bien sustituyendo a otros átomos o bien quedando incrustados), es cuando transfieren elevadas cantidades de su energía a la formación de *PKA*. A diferencia con los neutrones, que emplean casi siempre toda su energía a la formación de *PKA*, pues despreciaremos su interacción con los electrones.



*Propiedad de Jesús P. de Vicente, cedida al dominio público.*

**Figura B.2-1:** Variación energética de diferentes proyectiles iónicos en función de la distancia de penetración. Caso de iones de hierro de 50, 100, 200, 300 y 400 MeV en un medio homogéneo de hierro.

Esta diferencia energética entre ambos tipos de radiación es de extrema importancia en el espectro de formación de *PKA*. Pues tiene como consecuencia, que los neutrones estén en condiciones de producir *PKA* de mayor energía que los iones, como puede ponerse de manifiesto en la ecuación A-7, donde la energía transferida depende la energía del proyectil incidente.

Además, los neutrones producen átomos desplazados (*PKA*) nada más entrar dentro del material, sin embargo los iones lo hacen cuando su energía es ya muy reducida. Esto se traduce en una continua producción de *daño primario* para el caso de los neutrones, sin embargo en una producción localizada para el caso de los iones.

### B.2.2 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL DAÑO

Hemos hecho una comparación, sobre como pierden su energía la radiación neutrónica y la iónica cuando atraviesan un medio material, pero cabe realizarse también una comparación espacial. En la radiación neutrónica, la separación entre dos interacciones sucesivas de un neutrón suele ser relativamente elevada, y prácticamente constante a lo largo de todo su camino, debido a la pequeña relación que mantienen el alcance de la interacción nuclear fuerte y el radio atómico, que permite interpretar las colisiones de los neutrones como si de «bolas de billar» se tratara. Es por lo que el neutrón debe recorrer largas distancias hasta que sea probable su colisión con un núcleo. Para que esta aproximación sea válida es necesaria la homogeneidad e isotropía de la red.

Por otro lado, en el caso de la radiación iónica, las interacciones electromagnéticas tienen elevado alcance, que hacen que su relación con el radio atómico sea elevada. Entonces cuando las *pérdidas por ionización* han frenado lo suficiente al ión, como para que empiece a producirse la transferencia energética a los núcleos del blanco, la probabilidad de interacción es muy elevada. Es por ello que la distancia entre dos interacciones sucesivas es pequeña, y va siendo cada vez menor, hasta que llega a ser del orden de la *separación atómica*, momento en el que el ión queda implantado.

Como conclusión, una pequeña parte de la energía del ión se emplea en producir *daño primario*, al contrario que en un neutrón. Y mientras que la deposición de esta energía, está distribuida espacialmente de forma homogénea, a lo largo del recorrido de un neutrón, para el caso de un ión no es homogénea, sino que tiende a localizarse allá donde el ión ya ha perdido casi toda su energía.

Si queremos entonces emular el daño de la radiación neutrónica mediante la radiación iónica tenemos dos opciones. La primera de ellas consiste en aprovechar la continua producción de *PKA*, pero pequeña, debida a la zona del recorrido del proyectil donde comentábamos que predominaban las *pérdidas por ionización*. En la figura B.2-1 podemos apreciar como la energía empleada en la producción de *PKA* es inicialmente pequeña, en comparación con la *pérdida por ionización*, pero se produce de forma continua y constante dentro de un rango (el «ruido» puede atribuirse al error estadístico). La otra opción es aprovechar la elevada producción de *PKA* de la zona donde comienzan a disminuir las *pérdidas por ionización*.

Nosotros usaremos la segunda de las opciones, pues tiene como ventaja una mayor tasa de producción de daño, lo cual sería interesante para acelerar la producción de daño. Aunque como desventaja, el daño queda localizado en una pequeña región del material, de volumen demasiado pequeño, que dificulta el estudio de los *efectos de la radiación* en las muestras. Sin embargo, solucionaremos este problema, irradiando la muestra con iones de diferentes energías, para tener varias zonas de *daño primario*, localizadas a diferentes profundidades. La suma de todas ellas podría ser equivalente a una zona dañada de tamaño mayor.



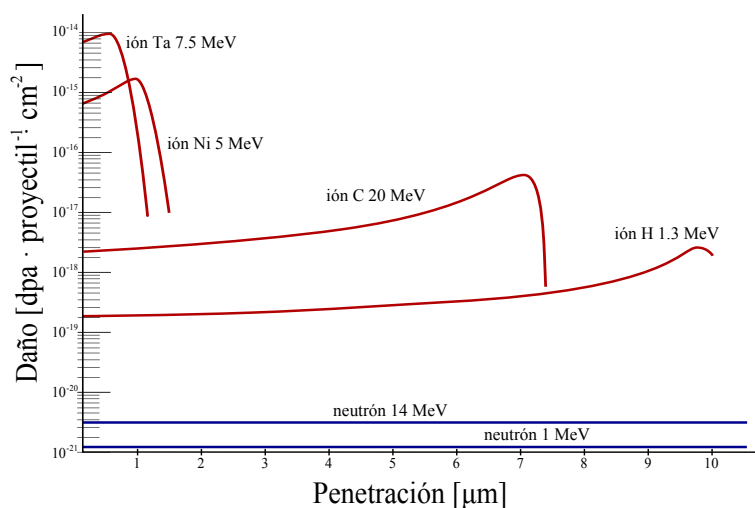
## B.3 DEMOSTRACIÓN TEÓRICA

En este capítulo intentaremos demostrar la validez del uso de la radiación iónica para la emulación del *daño primario* generado por la radiación neutrónica, en los materiales de un posible futuro reactor comercial de fusión de primera generación. En el capítulo A.4 (pág. 148) se justifica que una forma de evaluar el *daño primario* es mediante la medida los *dpa* producidos (desplazamientos que la radiación produce por cada átomo de la red). Por tanto, intentaremos demostrar la equivalencia entre los *dpa* generados por la radiación neutrónica y la radiación iónica.

### B.3.1 MAGNITUD DEL DAÑO PRIMARIO

Si va a procederse a la emulación de los *dpa* que la radiación neutrónica produce, sería interesante comprobar primero, que los *dpa* que la radiación iónica produce en el material es superior. Decimos superior, y no igual, pues de lo contrario, tendríamos que irradiar la muestra durante un tiempo igual al tiempo de operación del reactor, si queremos emular el daño que experimenta un material dentro del reactor durante toda su vida útil. La figura B.3-1 muestra los cálculos realizados por F. L. Vook *et al* [95], y podemos ver una comparación cuantitativa de los *dpa* que se producen en níquel por irradiación neutrónica e irradiación iónica, ambas con energías del mismo orden. En esta figura se comprueba que los *dpa* producidos por la radiación iónica pueden llegar a ser de dos a siete órdenes superior que en la radiación neutrónica. Esto es debido no sólo a lo que comentábamos en el apartado B.2.2 (pág. 160), cuando hacíamos referencia a que un neutrón depositaba su energía a lo largo de un mayor recorrido y que por tanto su transferencia de energía por unidad de longitud era menor, sino que también es debido a que la máxima transferencia de energía se produce cuando las masas del proyectil y blanco tienden a ser iguales (como puede deducirse si se maximiza la ecuación A-7 en función de la masa del proyectil), por tanto para nuestro caso, la masa de un ión se aproxima más a la masa de un átomo del

material que la masa de un neutrón, por lo que su transferencia de energía por colisión individual será mayor.



Propiedad de F. L. Vook [95].

**Figura B.3-1:** Comparación en la producción de daño primario en níquel por neutrones e iones. Casos de irradiación de con neutrones de 1 MeV y 14 MeV, e iones de Ta (1 MeV), Ni (5 MeV), C (20 MeV) e H (1,3 MeV).

Tenemos entonces demostrada la elevada tasa de producción de daño, pero que dependerá en última instancia del flujo de iones con que sea irradiado el material.

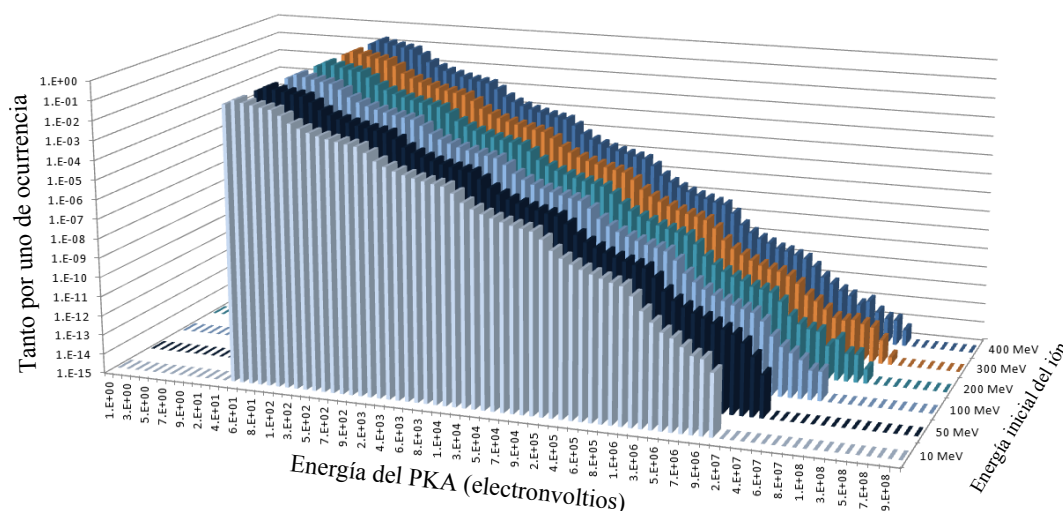
### B.3.2 ESPECTROS DE PKA

Como ya se ha indicado, existe diferencia entre en la formación de *PKA* para un tipo de radiación y para la otra. Por lo que procederemos a cuantificar esta diferencia con objeto de poder evaluar la validez de la emulación con iones.

Esta diferencia es importante, pues aunque una misma radiación de neutrones y otra de iones puedan producir al final el mismo número de *dpa*, estos podrían estar distribuidos espacialmente de forma muy diferente. Pues mientras que los neutrones cuando colisionan con un núcleo atómico transfieren una elevada cantidad de energía, como puede comprobarse en el espectro de *PKA* de la radiación neutrónica de la figura A.4-1 del

ANEXO A, los iones a lo largo de su recorrido transfieren a los *PKA* poca energía, como ha quedado de manifiesto en la figura B.2-1, donde la energía para la formación de *PKA* puede apreciarse que es pequeña durante toda la trayectoria del ión excepto cuando crece puntualmente al final de su recorrido. Entonces un *PKA* de elevada energía disipa su energía a muchos átomos de la red denominados *RECOILS*, formándose extensas cascadas de desplazamiento. Sin embargo un *PKA* de poca energía, como los formados por la radiación iónica, no podrá transmitir energía a muchos *RECOILS* siendo sus cascadas de desplazamientos más reducidas en extensión y número.

En la figura B.3-2 se representan los espectros energéticos de los *PKA* formados por radiaciones de iones de diferentes energías iniciales. La elaboración de estos espectros ha sido llevada a cabo mediante el análisis de simulaciones realizadas con el código *TRIM*. Puede observarse, como ya se comentó anteriormente, la elevada producción de *PKA* de baja energía.



Propiedad de Jesús P. de Vicente, cedida al dominio público.

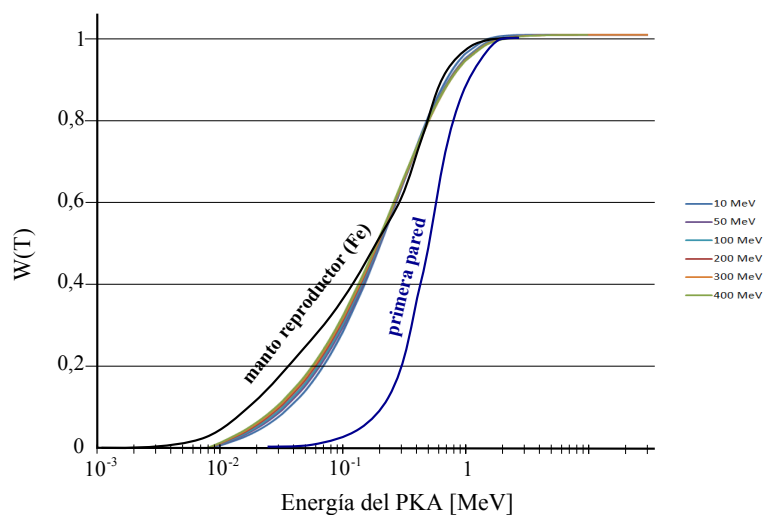
**Figura B.3-2:** Espectro de *PKA* producidos por iones de hierro de diferentes energías penetrando material puro de hierro.

### B.3.3 FUNCIONES DE DAÑO

En el capítulo A.4 (pág. 148) del ANEXO A se comenta que la mejor forma de cuantificar la distribución del daño es mediante la *función de daño*, la cual lleva implícitamente la información referida al daño producido por los diferentes *PKA*.

Las *funciones de daño*  $W(T)$  son distribuciones de probabilidad, pues representan el porcentaje de daño acumulado por todos los *PKA* de energía inferior a una determinada  $T$ . Entonces cuando  $T \rightarrow 0 : W(T) \rightarrow 0$  y cuando  $T \rightarrow \infty : W(T) \rightarrow 1$ .

En la figura B.3-3 se representan las *funciones de daño* características de diferentes radiaciones en un material de hierro. Las referentes a la radiación neutrónica en la *primera pared* y en el *manto reproductor* se han tomado de la figura A.4-4. Y las relativas a las radiaciones de diferentes energías de iones de hierro, han sido calculadas con el código *TRIM* mediante simulaciones de 10 000 iones, que generan un total de  $10^7$  *PKA*, almacenados en archivos de aproximadamente 1 GB. En tratamiento «masivo» de los datos de estos archivos fue llevado a cabo mediante el código *AWK*.



Propiedad de Jesús P. de Vicente, cedida al dominio público.

**Figura B.3-3:** Funciones de daño correspondientes a diferentes radiaciones.

Aunque pueda apreciarse en esta figura una buena aproximación entre las *funciones de daño* de las radiaciones iónicas y la neutrónica del *manto reproductor*, no es tan buena con la correspondiente a la *primera pared*. No obstante, podemos deducir que a medida que los neutrones atraviesan los materiales del reactor van perdiendo energía, por lo que el porcentaje de daño producido por los *PKA* de menor energía, que generan, va siendo mayor, aproximándose entonces las correspondientes *funciones daño* neutrónica y de iones. Es por tanto que tomaremos, *grosso modo*, como equivalentes los *daños primarios* de la radiación neutrónica y de la radiación con iones de hierro sobre materiales de hierro. Se confirma entonces la validez de la emulación del *daño primario* con iones.

## B.4 CÁLCULO DE RADIACIÓN IÓNICA

### B.4.1 AJUSTE DEL FLUJO DE IONES

En este apartado procedemos al cálculo del flujo de iones que debe tener la radiación iónica para emular, en tiempo real, el daño de la radiación neutrónica, que el capítulo A.4 (pág. 148) del ANEXO A se estimó en 6,7 dpa/año para la *primera pared* de DEMO.

Estamos hablando del flujo de iones y no de la intensidad del haz, puesto que para ello debiéramos conocer el estado de carga eléctrica de dichos iones, el cual debe establecerse en el dimensionamiento de la *fuentes de iones* y del *acelerador* de partículas. No obstante, las partículas del haz son neutralizadas antes del impactar contra la muestra material, por lo que no es de importancia el estado de carga en todo lo referente al presente anexo.

El flujo de iones  $Q$ , necesario para producir una tasa de daño  $d$ , viene dado por la ecuación B-1. La tasa de daño mínima que se desea emular es 6,7 dpa/año. Procedemos entonces a las estimación de los demás parámetros de esta ecuación.

$$d = DSQ \quad (\text{B-1})$$

donde,

$d$ , es la tasa de daño primario generado por la radiación, expresada en dpa por segundo.

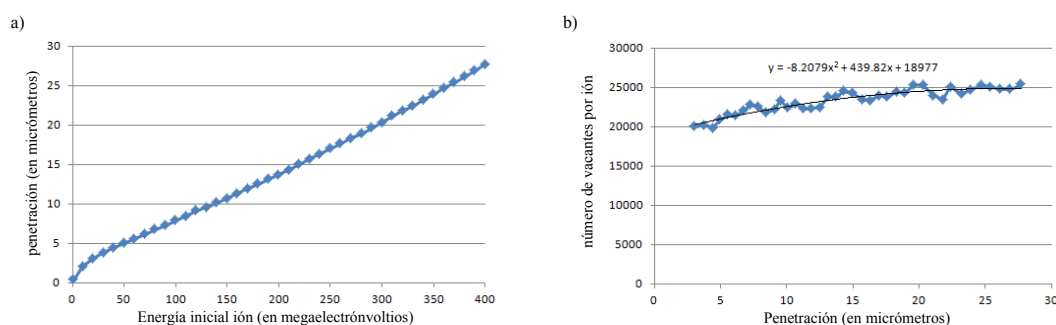
$D$ , es la el daño primario generado por ión, expresado en dpa por ión.

$S$ , es la superficie de irradiación, expresada en centímetros cuadrados.

$Q$ , es el flujo de iones de la radiación incidente, expresado en iones por segundo por centímetro cuadrado.

La figura B.4-1 a) muestra el rango de penetración de iones de hierro en material puro de hierro, en función de la energía inicial del ión, calculados con el código *TRIM*. Evidentemente a mayor energía del ión mayor será la penetración que puede conseguirse dentro del material. Sin embargo la figura B.4-1 b) muestra el número de vacantes producidas en función de la penetración, que en este caso no aumenta drásticamente, sino que lo

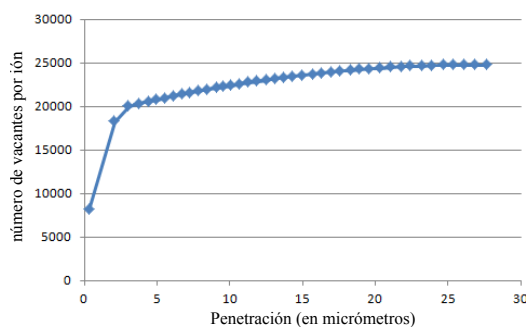
hace de forma lenta, puesto que como ya se ha comentado, casi toda la energía del ión es empleada en *pérdidas por ionización*, y no en producir daño por desplazamiento. En esta última figura se ha representado la línea de tendencia de su curva, así como también su ecuación analítica.



Propiedad de Jesús P. de Vicente, cedida al dominio público.

**Figura B.4-1:** a) Energía ión versus penetración, b) penetración versus daño generado.

Intentemos corregir el ruido estadístico de la figura B.4-1 b). Para ello derivaremos la expresión de su línea de tendencia, y con esta pendiente volvamos a reconstruir todos sus puntos, obteniendo la figura B.4-2.

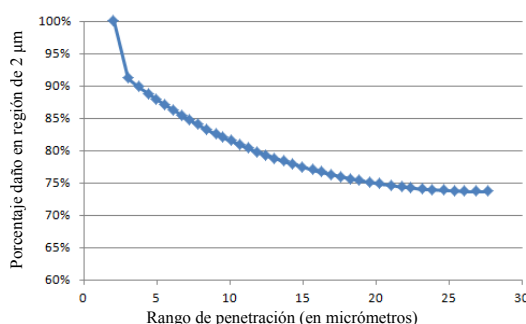


Propiedad de Jesús P. de Vicente, cedida al dominio público.

**Figura B.4-2:** Rango de penetración versus daño generado corregido.

En esta figura pude apreciarse como a partir de una penetración de 2  $\mu\text{m}$ , que corresponde a una radiación con iones de 10 MeV de energía, el daño producido no aumenta mucho cuando aumenta la energía inicial y por ende el rango de penetración. Por tanto haremos la suposición, que para cualquier energía de radiación, un alto porcentaje del daño por

desplazamiento estará concentrado en una región de 2  $\mu\text{m}$  de espesor, situada al final de la trayectoria de cada ión. Suposición avalada con la fenomenología de la radiación iónica descrita en capítulos anteriores. Es por este motivo que podemos representar en la figura B.4-3 el porcentaje de la energía de desplazamiento depositada en esa región con respecto a la energía total depositada por desplazamiento, en función del rango de penetración. En esta figura se aprecia como este porcentaje va disminuyendo a medida que aumenta la energía inicial del ión incidente, debido a que también se producen algunos desplazamientos fuera de la región establecida anteriormente, en la zona que hemos denominado de pérdidas por ionización.



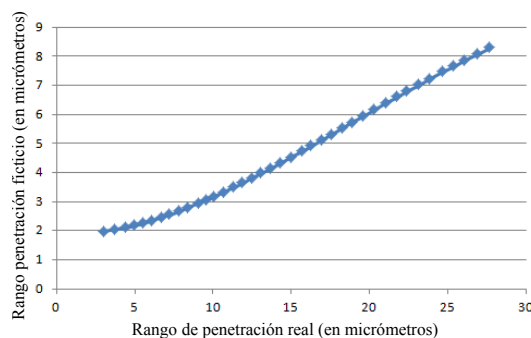
*Propiedad de Jesús P. de Vicente, cedida al dominio público.*

**Figura B.4-3:** Porcentaje de daño por desplazamiento en región de 2  $\mu\text{m}$ .

Si hacemos otras suposición, de una hipotética radiación iónica que a su paso por la materia fuera produciendo un daño constante y homogéneo; teniendo en cuenta los porcentajes calculados anteriormente y la energías depositadas por las radiaciones, podemos determinar la penetración ficticia de esa hipotética radiación, de forma tal que su daño fuera equivalente al de la radiación real. La figura B.4-4 representa esta ficticia penetración en función de la penetración real.

Por otro lado, cálculos con el código *TRIM* nos permiten tener el número de vacantes que produce un ión durante toda su penetración, así como también de la penetración ficticia que conseguiría un hipotético ión que depositara un elevado porcentaje de su energía de desplazamiento en una región de 2  $\mu\text{m}$ . Dividiendo este número de vacantes entre la penetración ficticia, y dividiendo el resultado a su vez entre la densidad atómica del





Propiedad de Jesús P. de Vicente, cedida al dominio público.

**Figura B.4-4:** Penetración ficticia en función de la penetración real.

hierro ( $8,49 \cdot 10^{28} \text{ at/m}^3$ ), obtenemos el producto del *daño primario* por ión incidente  $D$ , de la ecuación B-1, por la superficie de irradiación  $S$  de la misma ecuación. El máximo valor para este producto se consigue en el caso de irradiación con iones de 400 MeV, dando un valor de  $3,52 \cdot 10^{-16} (\text{dpa/ión}) \cdot \text{cm}^2$ . Introduciendo este valor en la ecuación B-1, y teniendo en cuenta el *daño primario* en la *primera pared* de DEMO (6,7 dpa/año), tenemos que el flujo de iones de hierro de 400 MeV necesario para emular en tiempo real el daño de DEMO debiera ser de **602 732 669 iones/(s·cm<sup>2</sup>)**, que redondearemos por exceso a **6,1 · 10<sup>8</sup> iones/(s·cm<sup>2</sup>)**.

### B.4.2 AJUSTES DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL DAÑO

Ya se ha comentado que la producción de daño por radiación iónica se concentra en la región final de su trayectoria. Con objeto de conseguir regiones superiores de daño en las muestras materiales, se propone la irradiación con haces de iones formados por iones de diferentes energías. De esta forma la suma de todas las pequeñas regiones de daño produciría una región de daño mayor.

## B.5 VENTAJAS DE LA EMULACIÓN IÓNICA

Con objeto de afianzar la selección realizada, exponemos las ventajas e inconvenientes que se pueden plantear con relación a la radiación neutrónica, y que son citadas por Y. Serruys [30], P. Trocellier [42] y F. L.VOOK [95]. En cuanto las ventajas son varias, a saber, a1) aceleración de la tasa de generación daño, que en comparación con el daño neutrónico puede llegar a ser un millón de veces superior. Nosotros cuantificaremos este aumento de tasa con un parámetro denominado *tasa de aumento de generación de daño*,  $\kappa$ , b1) si se realiza implantación simultánea de iones de hidrógeno y de helio, es posible regular la relación que estas implantaciones mantienen con los *dpa* generados, para de esta forma ajustarlas a los requerimientos de DEMO, c1) permite el estudio separado de la producción de daño y la implantación de hidrógeno y helio, lo cual no puede hacerse en la radiación neutrónica ni en la emulación con protones, d1) permite la implantación de diferentes elementos, e1) no se generan muestras radiactivas, ventaja que motivó que nos decantáramos por la emulación con iones pesados, f1) posibilidad de realizar ensayos de propiedades y caracterización de las muestras mientras son irradiadas, pues no se produce activación de las muestras, g1) reducido coste en comparación con las otras técnicas disponibles de emulación, y h1) versatilidad en cuanto a las irradiaciones realizadas.

En cuanto a los inconvenientes exponemos varios, a saber, a2) el aumento en la tasa de generación de daño puede desvirtuar la fidelidad con el daño neutrónico real del reactor de fusión, pues las escalas de tiempo pueden llegar a ser muy diferentes, b2) aunque se irradian con partículas muy energéticas, siempre el rango de penetración será inferior al conseguido con los neutrones, c2) debido a los pequeños rangos de penetración y en consecuencia la proximidad de la zona dañada a la superficie de la muestra, los fenómenos de superficie pueden llegar a tener relativa importancia, d2) debido a la localización de la zona dañada, el espectro de átomos desplazados será diferente al generado por los neutrones en el reactor de fusión, e2) el daño no es uniforme pues el neutrón deposita su energía de forma homogénea y continua, mientras que el ión pesado lo hace localizada y

puntual, y f2) la irradiación debe realizarse a cierta temperatura elevada, para reproducir las condiciones del reactor, pues la reestructuración de los defectos materiales producidos por los átomos desplazados, es función de la temperaturas, por lo que no pueden obviarse estas condiciones. Para rápida consulta, se han recogido también en la tabla B.5-1.

**Tabla B.5-1:** Ventajas e inconvenientes de la emulación con iones pesados

<b>Ventajas</b>	<b>Inconvenientes</b>
a1) Aceleración de la tasa de generación de daño	a2) Aumento de la tasa de generación de daño no asegura la fidelidad
b1) Regulación de las implantaciones de hidrógeno y helio	b2) Reducido rango de penetración de daño
c1) Separación de los estudio de daño y de elementos implantados	c2) Relativa importancia de fenómenos de superficie
d1) Implantación de diferentes elementos	d2) Diferente espectro de átomos desplazados
e1) No se generan muestras radiactivas	e2) Daño no uniforme en el rango de penetración
f1) Caracterización y ensayos durante la irradiación	f2) Irradiación debe realizarse a cierta temperatura
g1) Versatilidad en cuanto a radiaciones realizadas	

*Datos tomados de Y. Serruys [30], P. Trocellier [42] y F. L.VOOK [95].*

Los inconvenientes b2), c2), d2) y e2) pueden subsanarse con la irradiación de iones de diferentes energías, solución ya propuesta en el apartado 5.2 (pág. 32) .

ANEXO C

## **SELECCIÓN DE ACELERADOR**

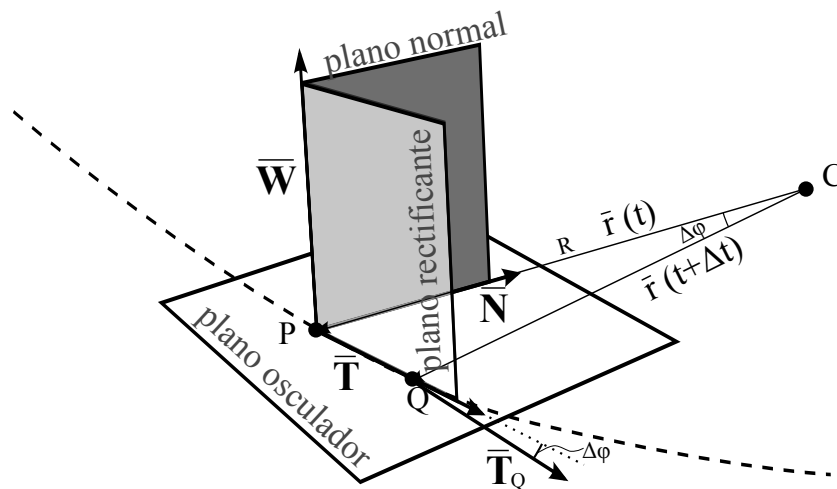
## C.1 ACELERADOR DE IONES PESADOS

### C.1.1 MÉTODO DE ACELERACIÓN ORBITAL

En este apartado procederemos a la descripción del *método de aceleración orbital* para iones pesados, como método alternativo a la *aceleración lineal*. El objetivo es determinar cuales son los parámetros básicos para la selección de un aparato basado en este método.

#### C.1.1.1 ACELERACIÓN EN COORDENADAS INTRÍNSECAS

Supongamos que tenemos definido un sistema de referencia cualquiera en un *espacio euclídeo*, y que también tenemos un *parámetro independiente*, el tiempo,  $t$ . En este sistema, una partícula puntual se desplaza desde su posición en el punto  $P$  en el instante  $t$ , hasta una posición en el punto  $Q$ , figura C.1-1. Para ello emplea un tiempo  $\Delta t$ . Por tanto, podemos definir los vectores de posición  $\vec{r}(t)$  y  $\vec{r}(t + \Delta t)$ , correspondientes a las posiciones  $P$  y  $Q$ , respectivamente, en el sistema de coordenadas ya definido.



Propiedad de Jesús P. de Vicente, cedida al dominio público.

Figura C.1-1: Definición de triedro de Frénet-Serret.

La partícula material es un ión, por lo que supondremos despreciable la probabilidad de que desaparezca en una reacción nuclear con otro ión (a no ser que alcance velocidades relativistas [63]). En tal caso, la función que define el *vector de posición*,  $\vec{r}(t)$ , puede suponerse continua. Por otro lado, supondremos también despreciable que una improbable colisión frontal entre iones (pues en un acelerador prácticamente todas las partículas siguen la misma dirección), pudiera producir una desviación angular de  $180^\circ$  en alguna trayectoria, por lo que la función  $\vec{r}(t)$  se supone también derivable. Entonces podemos garantizar la existencia de las posiciones de la partícula cuando la diferencia temporal entre ambas,  $\Delta t$ , tiende a cero, y por tanto que  $P$  y  $Q$  se aproximan hasta «casi poder considerarse» el mismo punto, pero no lo son, por lo que existe un vector espacial que los separa,  $\Delta \vec{r}(t)$ , que se obtiene de restar ambas posiciones,  $\vec{r}(t + \Delta t) - \vec{r}(t)$ . Entonces, si queremos obtener la *velocidad instantánea*,  $\vec{v}$ , de la partícula, es suficiente con hallar la relación entre  $\Delta r(t)$  y  $\Delta t$ , cuando  $\Delta t \rightarrow 0$ , que coincide con la definición de derivada, ecuación C-1.

$$\vec{v}(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}(t)}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\vec{r}(t + \Delta t) - \vec{r}(t)}{\Delta t} = \frac{d\vec{r}}{dt}(t) \quad (\text{C-1})$$

donde,

$t$ , es el *parámetro independiente tiempo*, expresado en segundos.

$\vec{r}(t)$ , es el *vector de posición* de la partícula, expresado en metros.

$\vec{v}(t)$ , es el *vector velocidad instantánea* de la partícula, expresado en metros por segundo.

Como se ha comentado, cuando  $\Delta t \rightarrow 0$  las posiciones  $P$  y  $Q$  se aproximan lo suficiente hasta «casi poder considerarse» el mismo punto, por lo que en tal caso, los vectores de posición  $\vec{r}(t + \Delta t)$  y  $\vec{r}(t)$  «prácticamente coinciden», y entonces la dirección del vector  $\Delta \vec{r}(t)$  puede considerarse tangente a la trayectoria de la partícula. La ecuación C-1 indica que la dirección de  $\vec{v}(t)$  es la misma que la dirección de  $\Delta \vec{r}(t)$ , por lo que la dirección de la velocidad de una partícula es tangente en todo instante a su trayectoria, y cuyo sentido es el del avance del movimiento. Definamos un nuevo vector unitario,  $\vec{T}$ , cuyo origen sea solidario a la posición de la partícula en todo instante, de dirección tangente

a la trayectoria, y sentido el del avance; y definamos el vector velocidad,  $\vec{v}(t)$  según este nuevo vector, ecuación C-2.

$$\vec{v}(t) = |\vec{v}(t)| \cdot \vec{T} \quad (\text{C-2})$$

El vector  $\vec{T}$  estará contenido en todo instante en el *plano osculador* (plano tangente en todo instante a la trayectoria por el punto cuyo movimiento la define), figura C.1-1. Si por el punto que define la posición de la partícula material, trazamos la dirección perpendicular a  $\vec{T}$  que esté contenida en el *plano osculador*, tenemos la dirección de un nuevo vector unitario,  $\vec{N}$ , cuyo sentido será hacia el *centro de curvatura*,  $C$ , de la trayectoria. El producto vectorial  $\vec{T} \times \vec{N}$  nos dará nuevamente la dirección y sentido de un tercer vector unitario, perpendicular a ambos, el vector  $\vec{W}$ . Los tres vectores  $\vec{T}$ ,  $\vec{N}$  y  $\vec{W}$  unitarios, y perpendiculares entre sí, forman una base ortonormal, conocida como *triedro de Frênet-Serret*, que será la base de un nuevo sistema de referencia intrínseco al movimiento, figura C.1-1.

Calculemos la aceleración,  $\vec{a}$ , de la partícula, para ello basta con derivar respecto al tiempo la velocidad,  $\vec{v}$ , que ya se definió en este nuevo sistema de referencia en la ecuación C-2. Obtenemos de esta forma la ecuación C-3.

$$\vec{a}(t) = \frac{d\vec{v}(t)}{dt} = \frac{d|\vec{v}(t)|}{dt} \cdot \vec{T} + |\vec{v}(t)| \cdot \frac{d\vec{T}}{dt} \quad (\text{C-3})$$

donde,

$a$ , es la aceleración de un ión, expresada en metros por segundo al cuadrado.

La derivada  $d\vec{T}/dt$  podemos expresarla en función de la base del *triedro de Frênet-Serret* teniendo en cuenta, que la dirección de la derivada de un vector es perpendicular a la dirección del propio vector, como ya se vio en el caso  $d\vec{r}/dt = |\vec{v}| \cdot \vec{T}$ . Existen infinitas direcciones perpendiculares a  $\vec{T}$ , pero sólo una de ellas está contenida en el *plano osculador*, es decir,  $\vec{N}$ . Como ya hemos comentado, en un flujo de partículas que siguen todas la misma dirección, es poco probable una colisión frontal de dos partículas que las haga cambiar las direcciones de sus velocidades de forma brusca, por lo que supondremos que la velocidad,  $\vec{v}(t)$ , es una función derivable (lleva la continuidad, además las partículas no

desaparecen), entonces se puede suponer que dos posiciones sucesivas del vector  $\vec{T}$ , están contenidas ambas en el *plano osculador*. Por tanto, podríamos establecer que la dirección de  $d\vec{T}/dt$  es la de  $\vec{N}$ , ecuación C-4.

$$\frac{d\vec{T}}{dt} = \left| \frac{d\vec{T}}{dt} \right| \cdot \vec{N} \quad (\text{C-4})$$

En cuanto al módulo de  $d\vec{T}/dt$ , en la figura C.1-1 puede apreciarse como el ángulo,  $\Delta\varphi$ , formado por dos posiciones de la dirección de la velocidad,  $\vec{T}$  y  $\vec{T}_Q$ , es el mismo que el formado por los vectores de posición  $\vec{r}(t)$  y  $\vec{r}(t + \Delta t)$ . Por lo que el valor de un diferencial de  $\vec{T}$ , es decir,  $|d\vec{T}|$ , sería proporcional al valor del arco formado por los vectores  $\vec{r}(t)$  y  $\vec{r}(t + dt)$ , es decir,  $ds$ , siendo la constante de proporcionalidad el *radio de curvatura*,  $R$ , tal y como se muestra en la ecuación C-5. Con este razonamiento, de la ecuación C-1, obtenemos la ecuación C-6.

$$\left| \frac{d\vec{T}}{dt} \right| = \frac{1}{R} \frac{ds}{dt} \quad (\text{C-5})$$

donde,

$R$ , es el *radio de curvatura de la trayectoria en cada instante, expresado en metros*.

$ds$ , es un *diferencial de longitud de arco, expresado en metros*.

$$|\vec{v}| = \frac{ds}{dt} \quad (\text{C-6})$$

De las las ecuaciones C-4, C-6 y C-5 obtenemos la ecuación C-7.

$$\frac{d\vec{T}}{dt} = \frac{1}{R} |\vec{v}| \cdot \vec{N} \quad (\text{C-7})$$

Introduciendo la ecuación C-7 en la ecuación C-3, tenemos una expresión para la aceleración de una partícula referida al sistema de referencia intrínseco, C-8.

$$\vec{a}(t) = \frac{d|\vec{v}(t)|}{dt} \cdot \vec{T} + \frac{|\vec{v}(t)|^2}{R} \cdot \vec{N} \quad (\text{C-8})$$



### C.1.1.2 TRAYECTORIA DE IÓN EN CAMPO MAGNÉTICO CONSTANTE

Supongamos que tenemos un campo magnético constante, cuya *densidad de flujo magnético* es  $\vec{B} = |\vec{B}| \cdot \vec{W}$ , siendo  $\vec{W}$  en principio un vector unitario cualquiera. Supongamos también que tenemos un ión, de carga eléctrica  $q$ , que tiene una velocidad  $\vec{v} = |\vec{v}| \cdot \vec{T}$ , donde  $\vec{T}$  es cualquier vector unitario perpendicular a  $\vec{W}$ . Establezcamos un sistema de coordenadas intrínseco al movimiento del ión (al igual que lo hicimos en el subapartado C.1.1.1 (pág. 174) ), cuya base sería la formada por los vectores  $\vec{W}$ ,  $\vec{T}$  y  $\vec{N}$ , este último definido por la relación  $\vec{W} = \vec{T} \times \vec{N}$ . Entonces, la fuerza,  $\vec{F}_m$ , que experimenta el ión, cuando atraviesa este campo, viene dada por la ecuación C-9.

$$|\vec{F}_m| \cdot \vec{N} = q \left( |\vec{v}| \cdot \vec{T} \right) \times \left( |\vec{B}| \cdot \vec{W} \right) \quad (\text{C-9})$$

donde,

$q$ , es la carga eléctrica del ión, expresada en coulombs.

$|\vec{F}_m|$ , es el valor de la fuerza que experimenta la partícula, expresada en newtons.

$|\vec{v}|$ , es el valor de la velocidad del ión, expresada en metros por segundo.

$|\vec{B}|$ , es el valor de la densidad de flujo magnético, expresada en teslas.

Teniendo en cuenta la *segunda ley de Newton*,  $\vec{F} = d\vec{p}/dt$ , donde  $\vec{p} = m\vec{v}$  es la cantidad de movimiento del ión, y suponiendo que su masa,  $m$ , permanece constante, pues no se alcanzan velocidades relativistas<sup>1</sup>, podemos relacionar las ecuaciones C-8 y C-9 por medio del parámetro de proporcionalidad  $m$ , para obtener de esta forma la expresión C-10.

$$q|\vec{v}||\vec{B}| \cdot \vec{N} = m \frac{d|\vec{v}|}{dt} \cdot \vec{T} + m \frac{|\vec{v}|^2}{R} \cdot \vec{N} = m\vec{a}(t) \quad (\text{C-10})$$

---

<sup>1</sup>La máxima energía cinética a la que aceleraremos un ión será 400 MeV, que para el caso de un ión de hierro, corresponden a una velocidad de aproximadamente  $37000 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ , que es el 12,33 % de la velocidad de la luz. Aunque en algunas aplicaciones, los efectos relativistas, puedan empezar a considerarse a partir del 90 % de la velocidad de la luz, no será el caso de nuestro proyecto, puesto que en la aceleración orbital de partículas, pequeñas variaciones en los parámetros del haz, pueden producir grandes desviaciones en el funcionamiento del acelerador, tal y como veremos en el apartado C.1.3 (pág. 189) . Pero hasta que lleguemos a tal punto, los supondremos despreciables.

De la expresión vectorial C-10 se obtienen las ecuaciones C-11 y C-12.

$$\frac{d|\vec{v}|}{dt} = 0 \quad (\text{C-11})$$

$$R = \frac{m|\vec{v}|}{q|\vec{B}|} \quad (\text{C-12})$$

La ecuación C-11 nos indica que el valor absoluto de la velocidad, de un ión que se desplaza en un campo magnético, permanece constante, y la ecuación C-12 nos indica, que si la ecuación C-11 se cumple y el campo magnético permanece constante, entonces el *radio de curvatura*,  $R$ , permanece constante en todo instante. El lugar geométrico donde que cumple esta condición es una circunferencia. Por tanto, la trayectoria de un ión que se desplaza en un campo magnético constante, sin ninguna otra acción externa, es siempre una circunferencia de radio  $R$ .

Para poder establecer la frecuencia de la corriente eléctrica (se mostrará más adelante), sería interesante calcular el tiempo que emplea el ión en recorrer una distancia cualquiera,  $s$ , dentro de la circunferencia. Para ello, de la ecuación C-6 obtenemos la ecuación C-13.

$$|\vec{v}| = \frac{ds}{dt} = R \frac{d\varphi}{dt} \quad (\text{C-13})$$

donde,

$\varphi$ , es el ángulo formado por los vectores de posición del instante inicial y de un instante cualquiera, expresado en radianes.

Suponiendo que el instante inicial corresponde a 0 s, y que para ese instante se establece el origen de ángulos, podemos pasar la ecuación C-13 a su forma integral, ecuación C-14.

$$\varphi = \frac{|\vec{v}|}{R} \cdot t \quad (\text{C-14})$$

Introduciendo la ecuación C-12 en la ecuación C-14 podemos obtener el tiempo que tarda el vector de posición,  $\vec{r}(t)$ , de un ión de carga  $q$ , en formar un ángulo  $\varphi$  en un campo magnético constante,  $\vec{B}$ , ecuación C-15. Es interesante observar, que este tiempo es in-

dependiente de la velocidad,  $\vec{v}$ , del ión, y del radio de la circunferencia,  $R$ , y que sólo podemos disminuirlo aumentando el valor de la densidad de flujo magnético,  $|\vec{B}|$ .

$$t = \frac{m\varphi}{q|\vec{B}|} \quad (\text{C-15})$$

### C.1.1.3 VELOCIDAD DE UN IÓN EN UN CAMPO ELECTROSTÁTICO

A diferencia del campo magnético, el campo eléctrico si es capaz de modificar la *energía cinética* del ión. Pues como se vio en la ecuación A-18, para una fuerza conservativa (como lo es la fuerza electrostática), la *energía potencial* se transforma en *energía cinética*. Teniendo en cuenta que el potencial electrostático,  $V$ , corresponde a la *energía potencial* por unidad de carga eléctrica del ión, como se aprecia en la ecuación C-16, podemos expresar la relación de la ecuación A-18 por la ecuación C-17.

$$V = -\frac{U}{q} \quad (\text{C-16})$$

donde,

$V$ , es el potencial electrostático, expresado en voltios.

$U$ , es la energía potencial, expresada en julios.

$q$ , es la carga eléctrica del ión, expresada en coulombs.

$$q \cdot (-V_A + V_B) = q \cdot \Delta V = E_B^c - E_A^c = \Delta E^c \quad (\text{C-17})$$

donde,

$E^c$ , es la energía cinética del ión, expresada en julios.

$A$  y  $B$ , son dos puntos cualesquiera.

De la ecuación C-16 podemos obtener el módulo de la velocidad final del ión, después de superar una diferencia de potencial  $\Delta V = V_B - V_A$ , ecuación C-18.

$$|\vec{v}_B| = \sqrt{\frac{2q}{m} \cdot \Delta V + |\vec{v}_A|^2} \quad (\text{C-18})$$

#### C.1.1.4 CONCEPTO DE CICLOTRÓN CLÁSICO

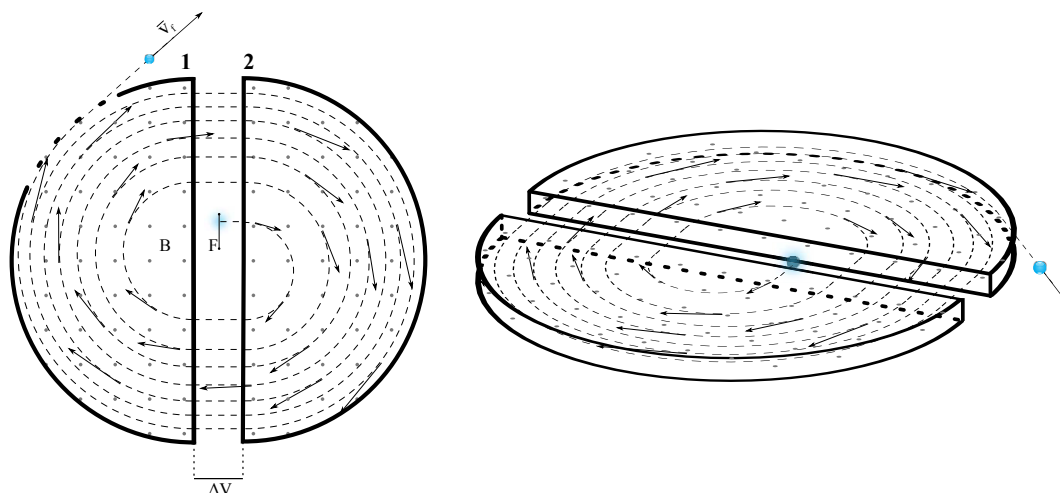
El *método de la aceleración orbital* aparece como complementario a los *aceleradores lineales*. Pero con la particularidad de no requerir *diferencias de potencial* muy elevadas, al contrario que en los *aceleradores lineales*, para acelerar partículas cargadas. Por ejemplo, si en un *acelerador lineal* se quiere acelerar un ión de hierro hasta que posea una energía cinética de 400 MeV (que corresponde a una velocidad de  $37\,000 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ ), según la ecuación C-18 sería necesaria una diferencia de potencial entre electrodos de aproximadamente 400 000 kV. Este cálculo se muestra en la ecuación C-19, donde se ha tenido en cuenta que ión de hierro tiene exceso (o defecto) de un solo electrón, y se ha despreciado en aumento de masa debido a los efectos relativistas.

$$\begin{aligned}\Delta V &= \frac{m}{2q} \cdot (|\vec{v}_B|^2 - |\vec{v}_A|^2) = \\ &= \frac{56 \frac{\text{nucleones}}{\text{ión de Fe}} \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \frac{\text{kg}}{\text{nucleón}}}{2 \cdot 1,60 \cdot 10^{-19} \frac{\text{C}}{\text{ión de Fe}}} \cdot (37\,000^2 - 0) \frac{\text{km}^2}{\text{s}^2} \quad (\text{C-19}) \\ &\approx 400\,000 \text{ kV}\end{aligned}$$

Aunque los *aceleradores lineales* realmente producen la aceleración en varias etapas, cada una ellas sigue teniendo una elevada diferencia de potencial entre electrodos, de lo contrario la dimensión longitud del acelerador sería excesiva, motivo por el cual en algunos casos se diseñan con geometría circular. Sin embargo, en los aceleradores basados en el *método de aceleración orbital*, la partícula es acelerada múltiples veces por una misma pareja de electrodos, no requiriéndose por tanto grandes diferencias de potencial. El primer acelerador por *método de aceleración orbital* fue diseñado por E. O. Lawrence y M. S. Livingston [96], y se conoce como *ciclotrón*, patentado en 1934 [13].

El esquema básico de funcionamiento de un *ciclotrón* es el mostrado en la figura C.1-2. En esta figura se pueden diferenciar dos partes, con formas semicirculares, que se denominan *electrodos* (1 y 2), pues como se verá, entre ambos existirá una *diferencia de potencial*,  $\Delta V$ . Los electrodos están constituidos por material metálico y están huecos en su interior. En el centro del *ciclotrón* se encuentra la *fente de iones*,  $F$ , que puede ser por ejemplo un

filamento metálico. Perpendicular a los *electrodos*, se aplica un campo magnético,  $\vec{B}$ , que se mantiene constante.



Propiedad de Jesús P. de Vicente, cedida al dominio público.

**Figura C.1-2:** Esquema de funcionamiento de un ciclotrón.

Si se calienta el filamento de la fuente de iones,  $F$ , aumenta la energía de sus electrones orbitales, aumentando entonces sus probabilidades de abandono del átomo, y la consiguiente formación de iones. Es en este momento, cuando la fuerza debida a la *diferencia de potencial*,  $\Delta V$ , entre los electrodos 1 y 2, actúa sobre los iones generados en el filamento, pudiendo superar a las fuerzas intermoleculares, liberando entonces al ión con una *energía cinética* determinada. En este momento el ión se dirige hacia uno de los *electrodos*, por ejemplo el 2, entrando en la región donde se encuentra el campo magnético uniforme,  $\vec{B}$ . Ya se comentó en el subapartado C.1.1.2 (pág. 178), que el ión en presencia de un campo magnético uniforme, describirá una trayectoria circular a velocidad constante. Pero la partícula no completa la circunferencia, sino que recorre solamente una semicircunferencia, pues llega al final del *electrodo* 2, donde es acelerado (aumenta su energía cinética) por una *diferencia de potencial*,  $-\Delta V$ , tal y como se vió en la ecuación C-17. Es entonces cuando la partícula entra en el *electrodo* 1, donde vuelve a encontrarse con el campo magnético uniforme,  $\vec{B}$ , que nuevamente le obliga a describir, a velocidad constante, otra trayectoria semicircular, pero de radio mayor, de valor dado por la ecuación C-12, pues el módulo de

la velocidad ha aumentado debido a la diferencia de potencial  $-\Delta V$ , como se comprueba en la ecuación C-18. Cuando el ión termina de recorrer su trayectoria semicircular, llega al final del *electrodo 1*, y vuelve a ser acelerado por una *diferencia de potencial*,  $\Delta V$ . Y de esta forma este proceso se repite hasta que el radio de la trayectoria se aproxima a las dimensiones de la estructura del *ciclotrón*, momento en el cual la partícula sale del *ciclotrón* con la *energía cinética* determinada (*velocidad final*  $\vec{v}_f$ ). Y continúa con movimiento rectilíneo y uniforme, siempre y cuando no actúe ninguna fuerza sobre ella.

Debe notarse, que en el párrafo anterior hemos estado haciendo referencia a una *diferencia de potencial*,  $\Delta V$ , que ha ido cambiando de signo en cada trayectoria semicircular. Este cambio es necesario cada vez que el ión atraviesa la zona comprendida entre los *electrodos*, pues si de lo contrario, mantuviésemos constante el signo de la *diferencia de potencial*, en algunas ocasiones estaríamos decelerando al ión, no llegando nunca éste a ser extraído, y siendo poco efectivo el método de aceleración. La alternancia en la *diferencia de potencial* puede realizarse conectando uno de los *electrodos* a una *fuentes de corriente alterna*, y el otro «a tierra». La frecuencia de esta corriente alterna, debe estar en sincronismo con el *periodo orbital* de la partícula en el *ciclotrón*, para que de esta forma se produzca el efecto de resonancia en la aceleración. Para conseguir esto, no es necesario que la frecuencia de la corriente alterna sea ajustada en cada trayectoria, sino que se mantiene siempre constante, puesto que como se vio en la ecuación C-15, el tiempo que tarda en describir el ión una trayectoria circular es constante, pues no depende de ni del radio ni de la velocidad (que son los dos únicos parámetros que varían cuando la partícula es acelerada por la *diferencia de potencial*). Entonces, según la ecuación C-15, la *frecuencia*,  $f$ , conocida como *frecuencia de Larmor*, que es la frecuencia que la corriente alterna necesitaría para estar en resonancia con el movimiento del ión, vendría dada por la ecuación C-20.

$$f = \frac{q|\vec{B}|}{2\pi m} \quad (\text{C-20})$$

donde,

$f$ , es la frecuencia del movimiento circular del ión en el acelerador, medido en hertzios.

### C.1.1.5 PARÁMETROS BÁSICOS PARA SELECCIÓN DE CICLOTRÓN

En este subapartado intentaremos determinar cuáles son los parámetros básicos que influyen en la energía final del ión acelerado, para de esta forma proceder a la selección del *ciclotrón*. A priori, pudiera parecer que los parámetros básicos, fueran la *diferencia de potencial* entre los *electrodos*,  $\Delta V$ , las dimensiones del *ciclotrón* (particularmente el radio,  $R$ ), y el *campo magnético* uniforme, de *densidad de flujo magnético*  $\vec{B}$ .

Según la ecuación C-17, el aumento de *energía cinética* de un ión al atravesar el espacio comprendido entre los *electrodos*, es proporcional a la *diferencia de potencial*, por tanto, cuanto mayor sea esta *diferencia de potencial*,  $\Delta V$ , mayor será la velocidad,  $|\vec{v}_B|$ , que adquiere el ión en cada trayectoria semicircular. Si tenemos en cuenta la suma de todas las aceleraciones, debidas a todas las veces que ión pasa por la zona entre *electrodos* y es acelerado por la *diferencia de potencial*,  $\Delta V$ , tenemos que la velocidad final de salida del ión del *ciclotrón*,  $\vec{v}_f$ , es la dada por la ecuación C-21.

$$|\vec{v}_f| = \sqrt{n\Delta V \frac{2q}{m} + |\vec{v}_i|^2} \quad (\text{C-21})$$

donde,

$|\vec{v}_f|$ , es el valor de la velocidad final de salida del ión, expresado en metros por segundo.

$|\vec{v}_i|$ , es el valor de la velocidad inicial del entrada del ión a uno de los electrodos, desde la fuente de iones, expresado en metros por segundo.

$n$ , es el número de trayectorias semicirculares que experimenta el ión, sin dimensiones.

Por otro lado, la ecuación C-12 nos indica, que para una velocidad final  $|\vec{v}_f|$  tendríamos asociado un radio  $R$ , para la trayectoria semicircular, determinado, independiente de la *diferencia de potencial*,  $\Delta V$ , aplicada. Por tanto, son la dimensiones geométricas del *ciclotrón* (particularmente el radio  $R$ ) las que nos determinan la velocidad final del ión,  $|\vec{v}_f|$ , (su *energía cinética*). Entonces, fijando un radio  $R$  para el *ciclotrón*, la velocidad final,  $|\vec{v}_f|$ , de la ecuación C-21, se toma como constante en la ecuación C-21, y por tanto, un aumento de la *diferencia de potencial*,  $\Delta V$ , se traduce en una disminución del *número de vueltas* que recorre la partícula, y viceversa. Descartaremos entonces la *diferencia de potencial*,  $\Delta V$ , como

parámetro importante para la selección de un *ciclotrón*. Aunque realmente hay que tener en cuenta, que una *diferencia de potencial* muy pequeña, haría que el ión recorriera una larga serie de trayectorias semicirculares, tanto más próximas cuanto menor fuere su valor, debiéndose tener especial cuidado en la no interferencia entre los iones en el caso de un flujo continuo de partículas.

Nos quedan el radio  $R$  y el campo magnético  $\vec{B}$ , como parámetros básicos de selección. La relación entre ambos se expresó en la ecuación C-12, que puede ponerse en función de la energía cinética final de la partícula,  $E$ , ecuación C-22. En esta ecuación C-22, se pone de manifiesto que las dimensiones geométricas del *ciclotrón* y el campo magnético aplicado, están relacionados inversamente, por lo que para reducir la dimensiones del acelerador, es necesario aumentar el campo magnético. Si se quiere entonces un *ciclotrón* de reducidas dimensiones, es posible que fuera necesario recurrir al uso de la tecnología del imanes superconductores.

$$R = \frac{m}{q|\vec{B}|} \cdot \sqrt{\frac{2E}{m}} \quad (\text{C-22})$$

donde,

$E$ , es la energía cinética final de la partícula a la salida del ciclotrón, expresada en julios.

No tomaremos la frecuencia de la corriente alterna,  $f$ , como parámetro de selección, pues es dependiente de la densidad de campo magnético,  $\vec{B}$ . Si sería interesante tener en cuenta la *potencia del acelerador*, que depende del flujo de partículas y de la energía a la que éstas son aceleradas.

### C.1.2 ESTABILIDAD DEL HAZ DE IONES EN EL CICLOTRÓN

Uno de los aspectos más importantes, que debe tenerse en cuenta en el diseño de todo acelerador de partículas, es la estabilidad del haz. Aunque estos aceleradores son sistemas que operan en alto vacío, alguna partícula residual puede colisionar y producir la desviación de algunas de las partículas del haz. Una vez que la partícula, en nuestro caso el ión,

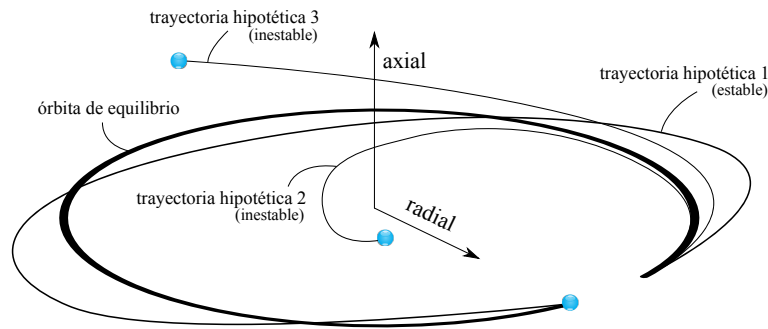


es desviada, ya no se encuentra en la *órbita de equilibrio*, por lo que es necesaria la existencia de un sistema de estabilidad que la devuelva a su posición original, de lo contrario terminaría chocando con la estructura sólida del sistema, perdiendo eficiencia la máquina.

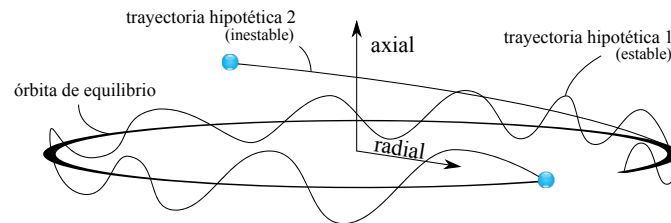
La *órbita de equilibrio* de un *ciclotrón*, es la trayectoria que recorren los iones si no se ven afectados por ninguna perturbación, es decir, la trayectoria ideal que se ha descrito hasta el momento. Cuando el ión se aleja de esta órbita, bien lo hace en la dirección radial o/y en la dirección axial, por lo que para simplificar su estudio, analizaremos por separado la estabilidad radial y la estabilidad axial. En la figura C.1-3 a) pueden apreciarse la *órbita de equilibrio* (una circunferencia), una trayectoria estable (num. 1), que tiende hacia la *órbita de equilibrio* cuando es perturbada radialmente, es decir, cuando el ión se escapa hacia el exterior, una fuerza estabilizadora tiene a llevarlo hacia el centro, y viceversa. También pueden observarse dos trayectorias inestables (nums. 2 y 3), que ante la perturbación, divergen del equilibrio, pues no existen fuerzas estabilizadoras que las corrijan. En la figura C.1-3 b), puede apreciarse el mismo caso, pero cuando las perturbaciones están contenidas en el plano axial, y por tanto, cuando el ión es desplazado en el sentido positivo de la dirección axial, una fuerza estabilizadora en la dirección contraria lo devuelve a la posición de equilibrio, en el caso de una trayectoria estable.

Una vez definida la *órbita de equilibrio* del *ciclotrón* y descrito el comportamiento de las trayectorias de los iones ante una situación de equilibrio estable o de equilibrio inestable, sería interesante describir como obtener las fuerzas estabilizadoras, que consiguen una situación de equilibrio estable, tanto para el caso radial como para el axial. En el diseño de *ciclotrón* descrito hasta el momento, la estabilidad radial está garantizada. Según se desprende de la ecuación C-10, la aceleración centrípeta,  $\vec{a}_N$ , que experimenta el ión es la dada por la ecuación C-23, donde como ya se ha visto, la *densidad de flujo magnético*,  $\vec{B}$  y la velocidad,  $\vec{v}$ , permanecen constantes, por tanto esta aceleración también permanece constante durante cada trayectoria semicircular. Como puede observarse en la figura C.1-4, si el ión se sitúa en la zona exterior a la *órbita de equilibrio* (zona correspondiente a una órbita de mayor radio), la fuerza centrípeta,  $\vec{a}_N$ , que permanece constante, hace que el ión describa una órbita del mismo radio que el de la *órbita de equilibrio*, por lo que terminará

## a) estabilidad radial



## b) estabilidad axial



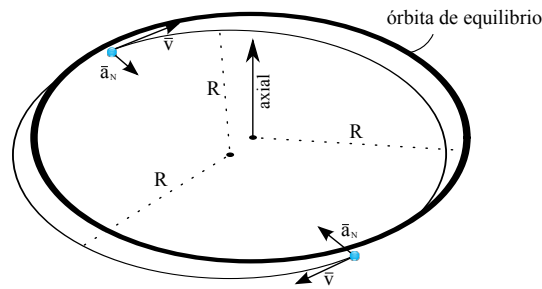
Propiedad de Jesús P. de Vicente, cedida al dominio público.

**Figura C.1-3:** Órbita de equilibrio de un haz de partículas en un ciclotrón. a) excursiones radiales de la trayectoria, b) excursiones axiales de la trayectoria.

interceptando a ésta. Si por el contrario, el ión es perturbado hacia una zona más interna, la fuerza centrípeta,  $\vec{a}_N$ , hará que ión describa entonces una órbita de radio mayor, que igualmente interceptará a la *órbita de equilibrio*. Por tanto, cualquier perturbación radial, terminará siendo corregida hacia la *órbita de equilibrio*.

$$\vec{a}_N = \frac{q|\vec{v}||\vec{B}|}{m} \cdot \vec{N} \quad (\text{C-23})$$

Sin embargo, no ocurre lo mismo en el caso de la estabilidad axial, donde el *ciclotrón* no genera fuerzas estabilizadoras ni desestabilizadoras, es decir, permanece neutro. Esto es debido a que la dirección de la densidad de campo magnético,  $\vec{B}$ , es siempre perpendicular a la velocidad,  $\vec{v}$ , y por tanto la fuerza generada por el campo magnético siempre tiene dirección radial, no pudiendo corregir entonces ninguna desviación axial.

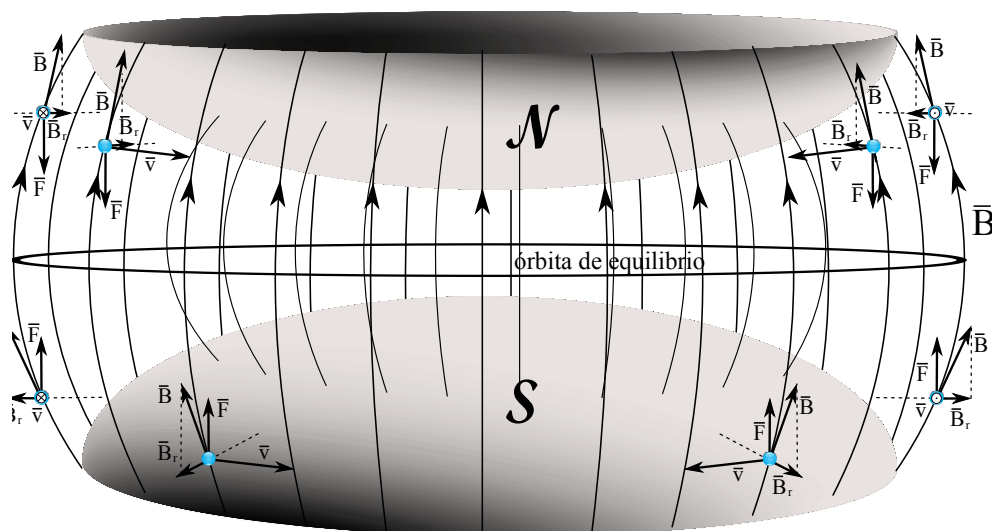


Propiedad de Jesús P. de Vicente, cedida al dominio público.

**Figura C.1-4:** Estabilidad radial en ciclotrón debido a que la fuerza centrípeta es constante.

La estabilidad axial del *ciclotrón*, puede conseguirse con la aplicación de un campo magnético en la dirección radial, que generaría una fuerza estabilizadora en la partícula en la dirección axial. Generar este nuevo campo, no requiere de una aplicación magnética externa, sino que es suficiente disponer de una geometría adecuada para los polos magnéticos. Esta geometría podría ser la representada en la figura C.1-5, donde la convexidad de las superficies de los polos hace que las líneas de campo se curven, tal y como se muestra en la citada figura. Esta curvatura de las líneas de campo, produce la aparición de una componente radial en el campo magnético,  $\vec{B}_r$ , cuando la partícula es desplazada de la *órbita de equilibrio*, y que produce una fuerza,  $\vec{F}$  en la dirección axial, y de sentido descendente si la perturbación es ascendente, y viceversa.

Debe tenerse especial cuidado con el diseño de la geometría de los polos, con objeto de conseguir la estabilidad axial, pues por ejemplo, en la figura C.1-5 hemos representado una geometría de polos donde el valor de la *densidad de flujo magnético*,  $\vec{B}$ , disminuye con el radio del *ciclotrón*. Esto provocaría inestabilidad radial en el haz de iones. Entonces debe buscarse una geometría, donde además de producirse la curvatura necesaria para la estabilidad axial, la componente axial del campo magnético,  $\vec{B}$  permanezca constante (o aumente) en función del radio.



Propiedad de Jesús P. de Vicente, cedida al dominio público.

**Figura C.1-5:** Estabilidad axial en ciclotrón debido a que la componente radial de la densidad de flujo magnético.

### C.1.3 PROBLEMÁTICA DEL CICLOTRÓN

El diseño básico del *ciclotrón* presenta un inconveniente para nuestro proyecto. Se trata del límite superior de energía, al que puede acelerar los iones. Describamos el «por qué» de este límite.

Según la *teoría especial de la relatividad*, existe equivalencia entre la masa de una partícula,  $m$ , y el valor de su velocidad,  $v$ , relación dada por la ecuación C-24. Según esta relación, cuando una partícula aumenta la velocidad relativa a un sistema de referencia inercia, un observador situado en dicho sistema, percibiría un aumento de masa aumenta en la citada partícula.

Como se comentó en una «nota de pie», en el subapartado C.1.1.2 (pág. 178), estábamos suponiendo despreciables los efectos relativistas cuando los iones eran acelerados en el *ciclotrón*. Pero estos efectos se hacen tanto más evidentes cuanto mayor es la energía a la que son acelerados los iones, motivo por el cual existe un límite técnico en las energías de salida de los estos iones en el *ciclotrón*. En la MEMORIA se especificó que la energía máxima de salida de los iones de hierro debiera ser 400 MeV. Veamos cuales como influyen

$$m = \frac{m_o}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \quad (\text{C-24})$$

donde,

$m_o$ , es la denominada masa en reposo, que se identifica con la masa de una partícula, que describe un movimiento uniformemente no acelerado, medida desde un sistema de referencia inercial solidario a su movimiento, expresa en kilogramos.

$c$ , es la velocidad de la luz en el vacío,  $299\,792\,458 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ , según la recomendación de la XV Conferencia General de Pesos y Medidas de 1975 [47], adoptada por el Sistema Internacional de Unidades, declarado de uso legal en España por el Real Decreto 1317/1989 [9]

los efectos relativistas en el proceso de aceleración de un haz de iones de hierro cuando se alcanzan esas energías, en un *ciclotrón*.

Si introducimos la ecuación C-24 en la ecuación C-20, tenemos la ecuación C-25, que muestra la frecuencia de giro orbital,  $f$ , de un ión en un ciclotrón, si se tienen en cuenta efecto relativista de aumento de la masa con la velocidad. En esta ecuación C-25, puede apreciarse ahora la dependencia de la frecuencia,  $f$ , con el valor de la velocidad del ión,  $|\vec{v}|$ , que sí varía cuando el ión atraviesa la zona comprendida entre *electrodos*. Por tanto, la frecuencia de giro orbital,  $f$ , ya no permanece constante durante todo el recorrido de la partícula en el *ciclotrón*, sino que va disminuyendo a medida que el ión es acelerado. Ello es debido a que el aumento de masa del ión hace que sea más difícil vencer su inercia, como indica la clásica *segunda ley de Newton*. En cuanto al valor de la velocidad,  $|\vec{v}|$ , que adquiere el ión después de ser acelerado por los *electrodos*, y al radio,  $R$ , de la órbita que describe el ión en cada semicircunferencia, se representan ahora por las ecuaciones C-26 y C-27 respectivamente, teniendo en cuenta los efectos relativistas. En cuanto a la ecuación de la velocidad,  $|\vec{v}|$ , ecuación C-26, se ha hecho la aproximación de suponer que la masa del ión, durante toda su aceleración, es en todo momento la que corresponde a la velocidad de entrada del ión a la zona comprendida entre *electrodos*.

$$f = \frac{qB}{2\pi m_o} \cdot \sqrt{1 - (v/c)^2} \quad (\text{C-25})$$

$$|\vec{v}_B| = \sqrt{\frac{2q}{m_o} \sqrt{1 - (v/c)^2} \cdot \Delta V + |\vec{v}_A|^2} \quad (\text{C-26})$$

$$R = \frac{m_o}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \cdot \frac{|\vec{v}|}{q|\vec{B}|} \quad (\text{C-27})$$

La frecuencia de giro orbital de la partícula deja entonces de estar en sincronismo con la frecuencia de la corriente alterna, que producía la *diferencia de potencial*,  $\Delta V$ , en los electrodos. Por tanto, no se produce el efecto de resonancia en la aceleración de la partícula, no consiguiéndose la energía de salida deseada, incluso pudiendo producirse la deceleración del ión.

Para poder apreciar la magnitud de los efectos relativistas, procedamos a aplicar las expresiones propuestas a las especificaciones del presente proyecto. La partícula a acelerar es un ión del isótopo 56 del hierro, por lo que supondremos que está compuesto veintiséis protones y treinta neutrones. Supondremos en una primera instancia, un exceso de un electrón. Por tanto, la masa en reposo,  $m_o$ , del ión corresponde a  $9,373\,598\,126 \cdot 10^{-26}$  kg y su carga eléctrica a  $1,602\,176\,487 \cdot 10^{-19}$  C. Para los parámetros del acelerador, valor de la *densidad de flujo magnético*,  $|\vec{B}|$  y *diferencia de potencial*,  $\Delta V$ , tomaremos como referencia (pues aún no hemos procedido al dimensionamiento de nuestro acelerador) los correspondientes a un acelerador comercial, cuyas características técnicas se aproximan a nuestros requisitos; el *ciclotrón isócrono*<sup>2</sup> Cyclone<sup>®</sup> 70 de la empresa IBA Group<sup>3</sup>. Según el catálogo técnico de este acelerador ( ANEXO D (pág. 221) ), podemos tomar para la *densidad de flujo magnético*,  $|\vec{B}|$ , un valor máximo de 1,7 T, y para la *diferencia de potencial entre electrodos*,  $\Delta V$ , un valor de 50 kV. Para estos valores, la frecuencia de giro orbital sin efectos relativistas (ecuación C-20) corresponde a 0,462 458 830 7 MHz, y por tanto esta sería la frecuencia de la corriente alterna necesaria para estar en sincronismo, no teniendo en cuenta los efectos relativistas. Pero si mediante un proceso iterativo, en donde supo-

---

<sup>2</sup>En el apartado C.1.4 (pág. 193) definiremos el concepto de ciclotrón isócrono.

<sup>3</sup>Empresa especializada en tecnología médica, que cuenta con una división líder en el diseño y construcción de ciclotrones.

nemos que la velocidad inicial del ión,  $|\vec{v}_A|$ , procedente de la fuente iónica, es cero, e introducimos este valor en la ecuación C-26, para obtener la velocidad hasta la que es acelerado,  $|\vec{v}_B|$ , y así sucesivamente, hasta que la velocidad del ión,  $|\vec{v}_B|$  corresponde a una energía cinética de 400 MeV, tenemos que la frecuencia de giro orbital del ión es ahora 0,458 954 462 5 MHz, según la ecuación C-25. Realmente, la frecuencia orbital del ión, a la entrada y a la salida, tan solo ha disminuido un 0,75 % debida al efecto relativista, pero aunque aparentemente sea un efecto despreciable, todo lo contrario, pues el ión ha realizado 7969 trayectorias semicirculares antes de alcanzar su energía final, por lo que en cada iteración se ha ido acumulando el desfase entre las frecuencias, habiendo momentos en los que en lugar de acelerar la partícula es invertida por la *diferencia de potencial*,  $\Delta V$ , es decir, es decelerándola.

Hemos comprobado la existencia de un límite superior, para la energía hasta la que pueden ser acelerados los iones en un *ciclotrón*. No obstante, puede conseguirse el sincronismo entre las frecuencias, para superar este límite. Para ello bastaría con que la frecuencia de la corriente alterna, hiciera un seguimiento de la frecuencia orbital de la partícula en cada trayectoria. Este es el fundamento de un acelerador orbital determinado, conocido como *sincrotrón*. Pero como indican W. E. Burcham [21] y R. Moreira [113], este seguimiento de la frecuencia además de complicar en exceso el diseño del sistema frecuencias de la corriente alterna, impide la aceleración de un flujo continuo de partículas, pues se debe ajustar la frecuencia de la *diferencia de potencial*,  $\Delta V$ , para cada rango de energías en cada trayectoria semicircular, siendo por tanto imposible la aceleración de un flujo continuo. La radiación neutrónica de un reactor de fusión se emite de forma continua, y no pulsada, por lo que para emular el daño que produce en la *primera pared*, lo más fielmente posible, deberíamos disponer de un flujo continuo de iones, por lo que descartamos la opción de un *sincrotrón* como acelerador para nuestros iones pesados.

Hemos descartado la opción de ajustar la frecuencia de la corriente alterna, pero podemos conseguir el sincronismo, así superar el límite de energía, ajustando la frecuencia orbital de giro de la partícula acelerada. Para ello, podemos compensar el aumento de masa, debido al efecto relativista, con un aumento de la *densidad de flujo magnético*,  $|\vec{B}|$ , a

mediada que aumenta el radio,  $R$ , de la trayectoria del ión, tal y como se deduce de la ecuación C-25. Este es el fundamento del *ciclotrón isócrono*, que si permite la producción de un flujo continuo de partículas, pues mantiene constante la frecuencia de la corriente alterna entre los *electrodos*.

#### C.1.4 CONCEPTO DE CICLOTRÓN ISÓCRONO

El *ciclotrón isócrono* es un acelerador de tipo ciclotrón, diseñado para vencer las limitaciones del *ciclotrón clásico*, en cuanto al límite de energía del haz de salida se refiere. Ya que, como se ha comentado en el apartado C.1.3 (pág. 189) , el origen de esta limitación está en el efecto relativista que hace que la masa de las partículas dependa de la energías. Esta limitación es superada mediante la aplicación de un campo magnético, de *densidad de flujo magnético*,  $\vec{B}$ , que sea función del radio del *ciclotrón*,  $R$ , de forma tal, que la variación del valor de la componente axial de este campo, sea proporcional a la variación de la masa. Por tanto, el valor de la *densidad de flujo magnético*,  $|\vec{B}|$ , crecería con el radio,  $R$ .

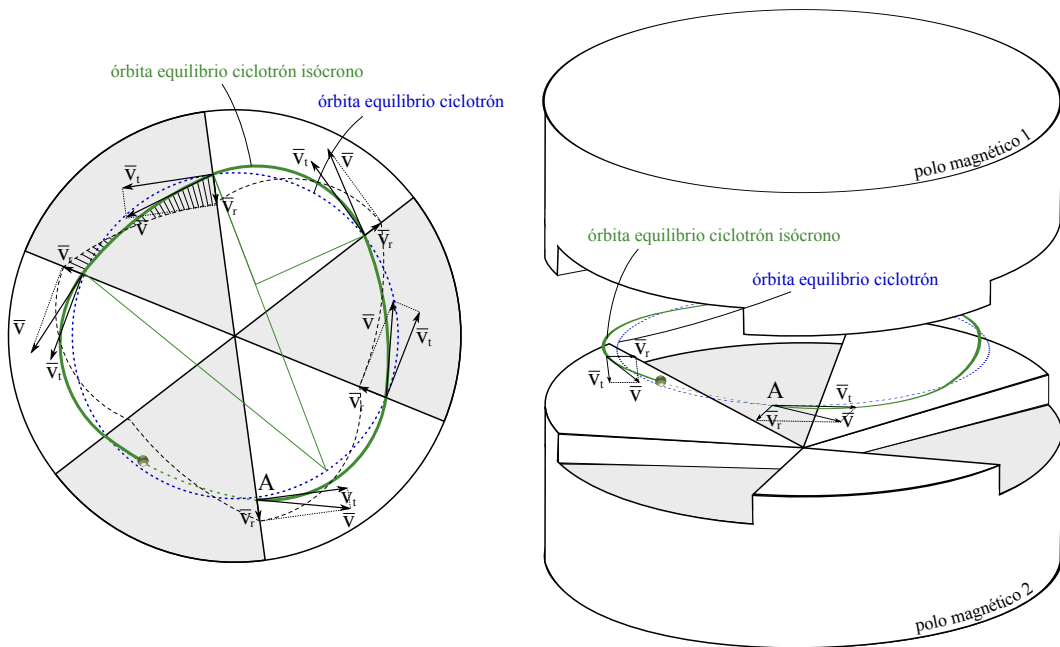
Como se vio en el apartado C.1.2 (pág. 185) , la aplicación de un campo magnético creciente con el radio, favorece la estabilidad radial del haz, pero produce inestabilidad axial. Pues se trata de la situación contraria a la expuesta en la figura C.1-5, donde las líneas de campos se curvarían hacia el centro del *ciclotrón*, haciendo que la componente axial del campo magnético, amplificara cualquier perturbación axial, en lugar de desvolver la partícula a su *órbita de equilibrio*.

Existen diversas formas para la generación de un campo magnético de este tipo, y que a su vez proporcione estabilidad axial, como por ejemplo el uso de determinadas bobinas superconductoras, que generarían un campo magnético decreciente con el radio, pero que sólo cuando los efectos relativistas empezaran a ser considerables, generarían un campo magnético creciente (sistema patentado en 1980 [14] ). Sin embargo, centraremos nuestra atención en el sistema usado por la empresa *IBA* en sus aceleradores, por ser el sistema usado por empresa líder en el diseño y construcción de este tipo de máquinas para usos comerciales e industriales, que fue patentado originalmente en 1988 [15] . Este sistema



consiste en el diseño de polos magnéticos con una determinada geometría. Pasemos a describir este sistema de forma conceptual.

Los polos magnéticos deben garantizar que el valor de la *densidad de flujo magnético*,  $|\vec{B}|$ , sea creciente con el radio, por lo que se diseñan con forma cóncava, tal y como se muestra en la figura C.1-6. De esta forma, los polos se aproximan a media que nos alejamos del centro del *ciclotrón*, siendo mayor el campo magnético entre ellos. En la figura C.1-6, la inclinación de los polos no está escalada correctamente, puesto que por ejemplo, en el caso expuesto del apartado C.1.3 (pág. 189), el incremento de masa que experimental un ión de hierro a 400 MeV, es tan sólo de 0,77 %.



Propiedad de Jesús P. de Vicente, cedida al dominio público.

**Figura C.1-6:** Disposición geométrica de los polos magnéticos en ciclotrón isócrono.

Como ya se ha comentado, la estabilidad radial está garantizada con un campo magnético creciente, pero veamos como conseguir también la estabilidad axial del haz. Si tanto en un polo magnético, como en el otro, se realizan una serie de muescas con formas de sectores circulares (según Karel Strijckmans [97] deben realizarse al menos tres), tal y como se muestra en la figura C.1-6, la *órbita de equilibrio* de los iones, deja de ser una circunferencia

(contrario al caso del *ciclotrón* clásico), para convertirse en una curva como la mostrada en la figura C.1-6. Esta curva, es debida a que cuando un ión atraviesa una zona donde no se han realizado las muescas, el campo magnético es más intenso, puesto que los polos están más próximos. Por tanto, según la ecuación C-27, el radio de curvatura, de la trayectoria del ión, es menor que cuando atraviesa una zona donde si se hayan realizado muescas en los polos, puesto que en este último caso, el campo magnético es menos intenso, al estar los polos más separados.

En la figura C.1-6 puede apreciarse la trayectoria de un ión, en un *ciclotrón isócrono*. Si se supone que no puede afectarle ninguna perturbación, la trayectoria que describirá, será la *órbita de equilibrio*. En esta figura, puede deducirse, que cuando el ión recorre una zona de campo magnético de baja intensidad, que como ya se ha comentado el radio de curvatura de su trayectoria es mayor que cuando atraviesa una zona de campo magnético de alta intensidad, su trayectoria tiende a estar más alejada del centro del *ciclotrón*. Y cuando el ión alcanza una zona de campo magnético de alta intensidad, al tener menor radio de curvatura, su trayectoria tiende a estar más cerca.

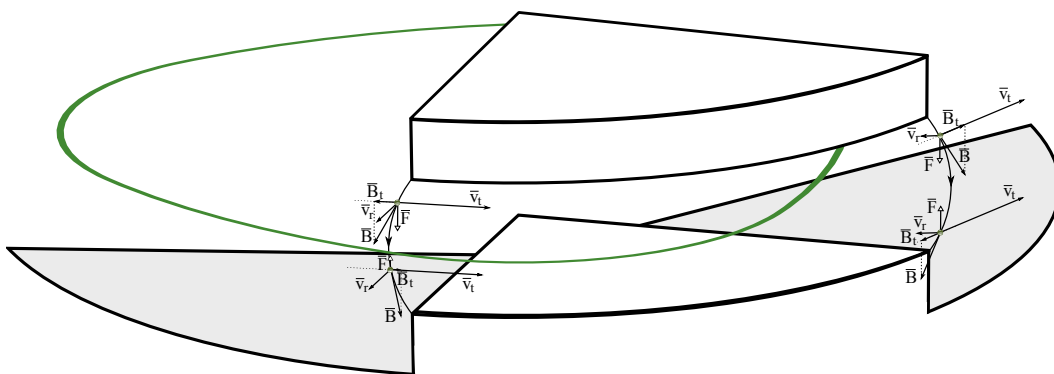
Este continuo vaivén de las trayectorias, según atraviere una zona de alta o de baja intensidad magnética, tiene como resultado la aparición de una componente radial de la velocidad<sup>4</sup>,  $\vec{v}_r$ , que como se verá más adelante, contribuye a la estabilidad axial del haz. Si el ión avanza en el sentido del avance de las «agujas del reloj», cuando atraviere una zona de baja intensidad magnética, intentará alejar su trayectoria del centro del *ciclotrón*, por lo que cuando el ión llegue a una zona de alto campo magnético, lo hará con una velocidad que tiene una componente radial,  $\vec{v}_r$ , con sentido hacia afuera de la máquina. Entrará entonces en una zona de alto campo magnético, y su trayectoria será más curva, y por tanto tenderá a estar más cerca del centro. Entonces, cuando llegue de nuevo a una zona de baja intensidad magnética, lo hará con una velocidad de componente radial,  $\vec{v}_r$ ,

---

<sup>4</sup>La aparición de una componente radial de la velocidad, no quiere decir que las trayectorias no sean circulares, sino que el eje con el que se toma la referencia radial es el del *ciclotrón*, y los centros de curvatura de las trayectorias, no coinciden con el centro de esta máquina.

de sentido hacia el centro. Y así sucesivamente, pero con valores diferentes para los radios de curvatura en función de la energía de la partícula.

Por otro lado, las líneas de campo magnético, no sólo se curvan en la dirección radial del *ciclotrón* (debido a la concavidad geométrica de los polos), sino que también lo hacen en la dirección tangencial en las fronteras que separan las zonas de alta y baja intensidad de campo magnético, debido a esta diferencia de intensidad. Las líneas de campo magnético se curvan hacia fuera de las zonas de alto campo magnético (zona sin muescas), tal y como se puede ver en la figura C.1-7. El resultado de esta curvatura, es la aparición de una componente tangencial del campo magnético,  $\vec{B}_t$ . Entonces, debido a la componente radial de la velocidad,  $\vec{v}_r$ , y a la componente tangencial del campo magnético,  $\vec{B}_t$ , según la ecuación C-9 aparece una fuerza de dirección axial,  $\vec{F}$ , que para cualquier posición y perturbación de la partícula, intenta restablecer su trayectoria hacia la *órbita de equilibrio*, tal y como se muestra en la figura C.1-7. Es muy importante tener en cuenta la polaridad de los polos magnéticos, pues la inversión del sentido del campo magnético, tiene como consecuencia una situación de equilibrio inestable, tal y como se podría comprobar en la figura C.1-7 si se invirtiera el sentido del campo magnético,  $\vec{B}$ .



Propiedad de Jesús P. de Vicente, cedida al dominio público.

**Figura C.1-7:** Estabilidad axial en ciclotrón isócrono.

Hemos comprobado que el *ciclotrón isócrono* permite acelerar iones a energías elevadas, pues corrige de forma automática el efecto relativista de aumento de masa. Y también

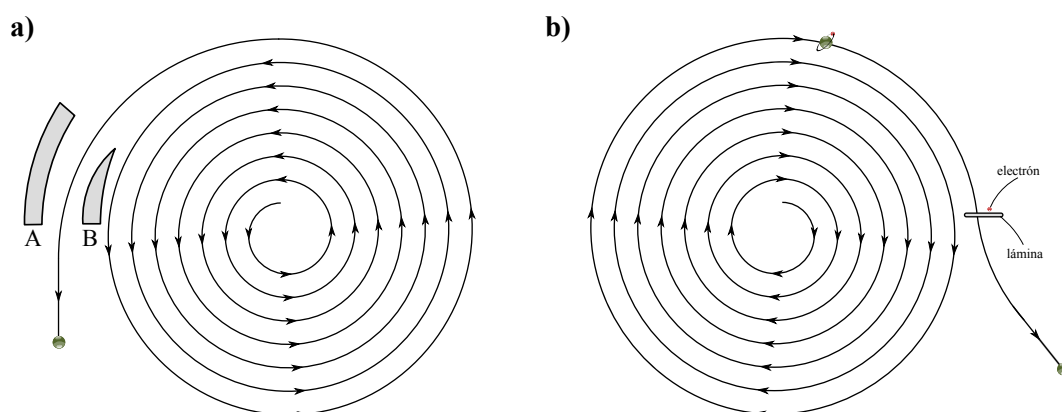
hemos comprobado como la estabilidad, tanto radial como axial, está garantizada en este tipo de máquinas.

### C.1.5 EXTRACCIÓN DEL HAZ DE IONES DEL CICLOTRÓN

El principio de funcionamiento de un ciclotrón, permite la aceleración de iones, tanto de carga eléctrica positiva como negativa, pero el *sistema de extracción* de estas partículas, si depende de la naturaleza de la carga.

Describiremos los *sistema de extracción* usados por la empresa IBA (catálogo del acelerador Cyclone® 70 disponible en el ANEXO D (pág. 221) ), pues su larga experiencia en el diseño de *ciclotrones* probablemente sea un factor decisivo a la hora de seleccionar suministrador. Esta empresa, suele instalar dos *sistemas de extracción* en sus *ciclotrones*. Uno de ellos, es para la extracción de iones positivos, y consiste en el empleo de un *deflector electrostático*. Y el otro, para la extracción de iones negativos, consiste en una lámina delgada, que atrapa los electrones del haz de iones que la atraviesa. Ambos sistemas son descritos por Karel Strijckmans [97].

Un esquema de funcionamiento del sistema de extracción de iones positivos, se muestra en la figura C.1-8 a). Está formado por dos electrodos, uno de ellos, el más cercano al centro del *ciclotrón*, el *A*, no está cargado eléctricamente (pues se descarga de forma continua, por ejemplo conectándolo a otro cuerpo neutro de mayor tamaño, como a «tierra») actuando entonces de «tabique», mientras que el otro, el más alejado, *B*, si lo está, pero negativamente. La disposición eléctrica de estos electrodos, no es caprichosa, sino que permite que mientras un ión positivo está siendo acelerado dentro de la máquina, su trayectoria no es perturbada por el campo eléctrico del *sistema extractor*, pues el electrodo más cercano, el *A*, apantalla el campo electrostático del electrodo *B*. Y sólo cuando la trayectoria del ión sea la más externa posible, comenzará a ser atraído por el campo electrostático del electrodo *B*, siendo de esta forma extraído del *ciclotrón*. La posición del electrodo *A* o «tabique», puede ser ajustada en función de la energía a la que se quiera extraer el ión.



Propiedad de Jesús P. de Vicente, cedida al dominio público.

**Figura C.1-8:** Sistemas de extracción del haz de iones de un ciclotrón. a) Sistema de extracción de iones positivos mediante el empleo de un *deflector*, b) sistema de extracción de iones negativos mediante el fenómeno de *stripping foil*.

En cuanto al *sistema extractor* de iones negativos, una lámina delgada, que generalmente es de carbón, es situada de forma perpendicular al haz en la última de sus trayectorias, tal y como se muestra en la figura C.1-8 b). Cuando un ión negativo atraviese esta lámina, será desprovisto de algunos de sus electrones, fenómeno conocido como «*stripping foil*». Si su carga eléctrica continúa siendo negativa, vuelve a ser acelerado por el *ciclotrón*, realizando una nueva vuelta y volviendo a impactar con la lámina. Si tras este impacto todavía continúa teniendo carga negativa, vuelve a realizar otra nueva vuelta. En caso contrario, su carga,  $q$ , será positiva, y según la ecuación C-9 experimentará una fuerza en dirección radial, pero sentido hacia fuera, que lo extraerá del acelerador. Como sistema de *stripping foil*, podría usarse el patentado por A. Yoshio [16]. Debe tenerse en cuenta, que el *sistema de extracción* de electrones requiere elevado mantenimiento y sustitución, pues el impacto del haz puede reducir notablemente su operatividad [98]. Este sistema no puede usarse para la extracción de iones positivos.

El *sistema de extracción* usando *deflector*, puede ser usado también para la extracción de iones negativos, pero se recomienda el uso de una lámina (*stripping foil*), pues produce una menor activación del sistema. En cualquier caso, la salida del *ciclotrón* es siempre un haz de iones positivo, independientemente de la naturaleza de la *fente de iones*.

### C.1.6 SELECCIÓN DE LA FUENTE DE IONES DEL CICLOTRÓN

El diseño del *ciclotrón isócrono* permite la aceleración tanto de iones con carga eléctrica positiva, como negativa. Como se verá en el apartado C.1.7 (pág. 208) , es recomendable la aceleración de iones con elevado estado de carga (positivo o negativo), pues de esta forma se reduce el campo magnético a usar, y el tamaño del *ciclotrón*.

Descartaremos entonces el uso de fuentes de iones negativos, pues no permiten la obtención de iones con elevada carga eléctrica. Debido a que la energía orbital de los sucesivos electrones adicionales, tendería a ser despreciable, y por tanto, estos electrones no podrían considerarse pertenecientes al ión, pues serían libres.

Centraremos por tanto nuestra atención a las fuente de iones positivos. Los principales parámetros para la selección de la *fuentes de iones* son tres, a saber, a) la energía cinética de salida de los iones, b) el estado de carga de los iones de salida y c) el número de iones que se obtienen en la unidad de tiempo. El parámetro a), no es relativamente muy importante para el presente proyecto, pues el destino de los iones es su entrada de un *ciclotrón*, y como se vio en subapartado C.1.1.5 (pág. 184) , la energía cinética inicial tan sólo influiría en el número de vueltas que recorrería la partícula en la máquina, no influyendo ni en la energía cinética final de los iones, ni en los parámetros de diseño del *ciclotrón*. El parámetro b) ya se ha comentado que es de extrema importancia para la reducción de costes de diseño del *ciclotrón*. Pero es el parámetros c) el parámetro técnico decisivo, pues el *flujo de iones*,  $Q$ , con que se irradia un material, está relacionado directamente con el *daño primario*.

En el ANEXO B (pág. 154) , se estimó que para emular en «tiempo real» el daño primario originado por los neutrones de un reactor de fusión, sobre la *primera pared*, era necesario el uso de un *flujo de iones*,  $Q$ , de 602 732 669 iones/(s·cm<sup>2</sup>). Evidentemente se hace necesario el aumento en la tasa de generación de *daño primario*, pues no se desea diseñar la instalación para irradiar muestras durante largos periodos de tiempo. Aumentando el *flujo de iones* en un factor  $\kappa$ , aumentamos en la misma proporción la *tasa de aumento de generación de daño primario*. Una sencilla forma de medir el *flujo de iones*, y que es usada como parámetro técnico por los fabricantes de *fuentes de iones*, es mediante el flujo de su intensidad eléctrica

ca,  $I$ , pues todo *flujo de iones* transporta carga eléctrica en movimiento. El *flujo de intensidad* y el *flujo de iones* están relacionados proporcionalmente, ecuación C-28, siendo la carga eléctrica del ión,  $q$ , o en su defecto su estado de carga,  $Z$ , la relación de proporcionalidad.

$$I = 1,602\,176\,487 \cdot 10^{-19} Z \kappa \cdot Q \quad (\text{C-28})$$

donde,

$I$ , es el *flujo de intensidad* correspondiente al *flujo de iones*, expresado en amperios por centímetro cuadrado.

$\kappa$ , es el factor que indica el aumento de la tasa de generación de daño primario, en relación con la correspondiente a condiciones de operación de un reactor de fusión comercial, sin dimensiones.

$Z$ , es el estado de carga eléctrica de cada uno de los iones, sin dimensiones.

$Q$ , es el *flujo de iones* a la salida de la fuente de iones, expresado en iones por segundo por centímetro cuadrado.

Entonces, el grado de ionización de los iones, representado por el estado de carga,  $Z$ , y el aumento en la *tasa de aumento de generación de daño primario*,  $\kappa$ , nos obligan llegar a una solución de compromiso, pues un elevado  $\kappa$  requiere un elevado flujo de intensidad,  $I$ , que en principio está «reñido» con el grado de ionización,  $Z$ , aumentando es coste del *ciclotrón*. Nos veremos obligados entonces, a seleccionar aquella tecnología para la *fuentes de iones*, que proporcione los valores más elevados posible para  $\kappa Q$  y  $Z$ , siempre y cuando  $\kappa Q$  sea superior a  $602\,732\,669$  iones/(s·cm<sup>2</sup>) en al menos en diez órdenes de magnitud.

Son diversas las tecnologías usadas en las *fuentes de iones* positivos, pero solamente tres de ellas son ampliamente usadas para la alimentación de *ciclotrones*. Se trata de las técnicas *EBIT*, *EBIS* y *ECRIS*. Las dos primeras, *EBIS* y *EBIT* tienen el mismo principio de funcionamiento (bombardeo de los iones con un haz de electrones), y aunque ambas pueden llegar a grados de ionización del 100 %, es decir, despojar al ión de hierro completamente de sus electrones, solamente la segunda de ellas puede reunir la necesidades de *flujo de iones* que requiere nuestro proyecto [99], en especial el reciente *Dresden EBIS-SC* [114], desarrollado por la empresa *Dreebit*. Sin embargo, no usaremos esta tecnología, pues la salida del *flujo de iones* no es continua, y aunque se realiza mediante pulsos comprendidos entre 2  $\mu$ s y 40  $\mu$ s, se considera una escala de tiempo suficientemente elevada, pues

vimos en el subapartado A.3.1.2 (pág. 133) que algunos de los defectos primarios de la radiación puede llegar a reajustarse en un tiempo de 10 ps. Entonces, por eliminación, seleccionamos la tecnología *ECRIS* como la tecnología que usaremos para la *fuentes de iones*.

#### C.1.6.1 LA TECNOLOGÍA ECRIS

Muchas de las tecnologías usadas como *fuentes de iones positivos*, entre ellas la que se pretende describir, consisten en la transferencia de energía a los electrones del átomo que se pretenden ionizar, por parte de otros electrones libres. Si la energía que un *electrón orbital* recibe, es superior a la diferencia de energías entre su órbita y la superior, entonces es electrón promociona de órbita, y en consecuencia de estado de energía. Si este proceso se repite continuamente o si la energía recibida es suficientemente elevada, el electrón podría quedar liberado del átomo, quedando éste ionizado. Este fenómeno conduce a la producción de iones tanto más ionizados tanto más veces se repita sobre un mismo átomo. El estado de la materia, en que se encuentran los átomos una vez ionizados, se denomina plasma<sup>5</sup>.

La probabilidad de que un ión sea ionizado mediante una única colisión con un electrón libre, es tanto menor tanto mayor se pretenda que sea su estado de carga final [100]. Puesto que nuestro objetivo es alcanzar iones con elevada carga eléctrica, no conseguiríamos un rendimiento aceptable mediante colisiones únicas, por lo que tendríamos que recurrir a sucesivas colisiones con los electrones libres. Conseguir esto, requeriría del confinamiento del plasma (iones y electrones libres), para conseguir el contacto durante el mayor tiempo y densidad posibles. Esto es lo que pretende conseguir la tecnología *ECRIS*. No obstante, la energía de los electrones libres debe ser suficiente como para impedir su recombinación con los iones.

---

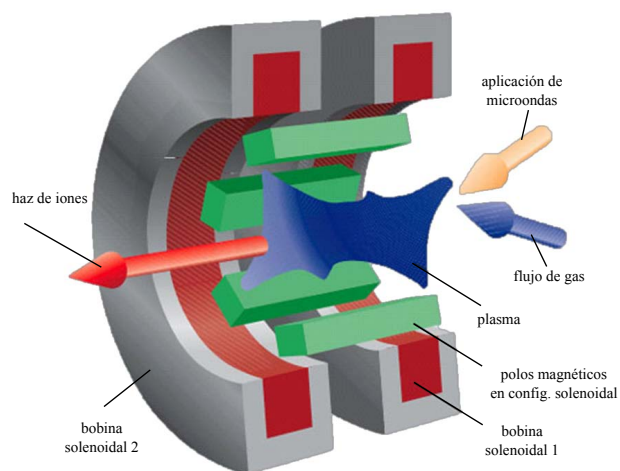
<sup>5</sup>El plasma puede ser considerado como «el cuarto estado de la materia». La materia transforma su estado de gas a plasma cuando la aplicación de energía cinética (temperatura) a los electrones de sus átomos, es suficiente como para que comiencen a liberarse.



La tecnología *ECRIS* [101] («*Electron Cyclotron Resonance Ion Source*») ioniza moléculas, en estado gaseoso, del átomo que se pretende ionizar, mediante colisiones con electrones libres. Más adelante se describirá un método para obtener estas moléculas en el caso del hierro. Para proporcionar energía a estos electrones libres, utiliza un ciclotrón de tipo *ECR*. Conceptualmente, este tipo de ciclotrón difiere del que usaremos para la aceleración de iones pasados (*ciclotrón isócrono*) en la forma de proporcionar la energía necesaria para la aceleración. Mientras que en el *ciclotrón isócrono*, la energía a los iones era proporcionada mediante la diferencia de potencial existente en unos *electrodos*, el caso del *ECR*, la energía a los electrones es proporciona mediante ondas electromagnéticas, concretamente en el rango de las microondas. La frecuencia de estas microondas debe ser igual a la frecuencia de giro de los electrones (ecuación C-20, *frecuencia de Larmor*), que como ya se comprobó, permanece constante en todo *ciclotrón* (para el caso relativista se vio la forma de como conseguir también la constancia). Esta igualdad de frecuencias, permite conseguir la resonancia en la transferencia de energía, por parte de la componente eléctrica de las ondas electromagnéticas. Se ha comprobado experimentalmente, que la energía adquirida por los electrones es proporcional a la potencia de las microondas aplicadas [100].

En cuanto al confinamiento, al igual que en los *ciclotrones*, es realizado mediante la aplicación de campo magnético perpendicular a las órbitas de giro. Este campo magnético debe ser creciente desde el centro hacia el exterior de la máquina, para conseguir, no sólo la estabilidad axial, sino el confinamiento, que aumenta la densidad del plasma de iones y así su probabilidad de colisión con los electrones. La configuración geométrica de electroimanes, usada en este tipo de máquinas, es solenoidal. De esta forma, tal y como se muestra en la figura C.1-9, una hilera de seis polos magnéticos, distribuidos solenoidalmente, es arrollada por dos bobinas solenoidales de mayor radio, para conseguir un campo magnético que crece radialmente. Este sistema podría asemejarse conceptualmente al de un reactor de fusión nuclear por confinamiento magnético.

Entonces, en las órbitas más externas, se encontrarían orbitando circularmente los electrones libres, así como también el plasma de iones, que habría sido inyectado previamente en la máquina. Los electrones lo harían en un sentido, mientras que los iones lo harían en el



Propiedad de Daniela Leitner, Lawrence Berkeley National Laboratory.

**Figura C.1-9:** Disposición magnética en acelerador ECR para conseguir confinamiento del plasma.

contrario, puesto que tienen cargas eléctricas de distinto signo, favoreciéndose la probabilidad de colisión. Los electrones se mantienen orbitando en órbitas de radios constantes, pues la energía que les suministran las microondas, puede considerarse que la pierden con las colisiones con los electrones de los iones. Las colisiones entre electrones, como ya se ha comentado, producen el aumento del grado de ionización de los iones, hasta que la carga eléctrica de éstos es tal, que la influencia de un campo eléctrico externo llegue a ser suficiente como para desviarlos de manera apreciable, y producir así su extracción. Se obtiene de esta forma un flujo de iones positivo que es utilizado como *entrada* al *ciclotrón isócrono*. Conceptualmente, no sólo el confinamiento magnético producido en un ciclotrón ECR podría asemejarse al sistema de confinamiento del plasma en un reactor de fusión nuclear por confinamiento magnético, sino también el sistema de calentamiento por microondas.

La producción de átomos libres, correspondientes al metal que pretende ser ionizado, y que por tanto constituyen la entrada material del sistema ECRIS, pueden ser obtenidas por distintas técnicas. R. Geller [102] identifica tres de ellas, a saber, a) utilización de compuestos gaseosos inorgánicos, b) utilización de horno térmico, de forma tal que los átomos de metales de bajo punto de fusión son «arrancados» de su superficie (fenómeno conocido como «sputtering»), y c) introducción directamente en el acelerador ECR de

una muestra sólida del metal. Mediante estas técnicas, pueden conseguirse átomos de interés para nuestro proyecto, como por ejemplo el caso del isótopo-56 del hierro, que según R. Geller [102] para la técnica b), pueden obtenerse las corrientes mostradas en la tabla C.1-1.

**Tabla C.1-1:** Relación de corrientes eléctricas formadas por iones del isótopo-56 del hierro, para diferentes estados de carga. Iones producidos mediante la técnica del horno térmico.

Estado de carga	+10	+11	+13	+15	+17
Corriente eléctrica, expresada en microamperios	8	9	8	5	0,5

*Datos tomados de R. Geller [102], revista Review of Scientific Instruments.*

Sin embargo, la obtención de los átomos de hierro requiere el uso de potentes hornos de elevada temperatura, pues el punto de fusión del hierro se sitúa en torno a los 1809 K. No podremos entonces recurrir al uso de «hornos de miniatura», recomendados sólo para metales con puntos de fusión inferiores a 1273 K [103]. No obstante, el desarrollo de una nueva técnica, conocida como *MIVOC* (*Metal Ion from Volatile Compounds*) [104], permite la obtención de átomos de metales de elevado punto de fusión de forma simple. Esta técnica consiste en el uso de compuestos orgánicos con contenido del metal de interés. Estos compuestos tienen una presión de vapor relativamente elevada en relación a las presiones existentes en las cámaras de alto vacío, por lo que para llegar al equilibrio mecánico, tienden a evaporizarse, pero a presión atmosférica permanecerán en estado sólido. No se ha comentado, pero la cámara interna del *ciclotrón ECR* debe estar a alto vacío, para de esta forma no puedan interferir posibles moléculas residuales con el haz de electrones o con el plasma de iones. Por tanto, la vaporización del compuesto organometálico en la cámara del *ECR*, será tal, que se dispersará por todo su volumen.

Para el caso del hierro, el compuesto organometálico a emplear con la técnica *MIVOC* en un *ECR*, podría ser el *ferroceno*<sup>6</sup>. Este compuesto tiene una presión de vapor de 340 Pa

<sup>6</sup>El ferroceno ( $Fe(C_5H_5)_2$ ) es un compuesto químico perteneciente a la familia de los metallocenos. Uno de sus principales usos es como catalizador de la reacción de combustión de algunos combustibles fósiles.

a 373 K. En la tabla C.1-2 están representadas las corrientes eléctricas de Fe-56 obtenidas por H. Waldmann [105] y por K. E. Stiebing [106] usando la técnica *MIVOC*.

**Tabla C.1-2:** Relación de corrientes eléctricas formadas por iones del isótopo-56 del hierro, para diferentes estados de carga. Iones producidos mediante la técnica *MIVOC*.

Estado de carga	corrientes eléctricas en microamperios								
	+2	+3	+5	+6	+9	+10	+11	+13	+15
Corriente eléctrica H. Waldmann [105]	5,5	4,66	9,20	10,1	7,00	3,98	2,12	0,41	0,04
Corriente eléctrica K. E. Stiebing [106]	-	-	-	≈ 0,30	≈ 2,70	≈ 4,40	≈ 4,30	≈ 0,50	-

H. Waldmann [105] y K. E. Stiebing [106].

### C.1.6.2 DIMENSIONAMIENTO Y SELECCIÓN DE ECRIS

En el subapartado C.1.6 (pág. 199) hemos procedido a la selección de la tecnología *ECRIS* para la *fente de iones*, *F*, que servirá de entrada material al *ciclotrón isócrono*. Queda realizar el dimensionamiento de los parámetros necesarios para dicha máquina así como su selección.

Las características geométricas del haz de iones, producido en este tipo de máquinas, y en general también de los *ciclotrones*, no suelen ajustarse a los requerimientos del usuario. Por lo que se hace necesario un posterior proceso de focalización del haz. Entonces en lo que las especificaciones de las máquinas *ECRIS* se centran, es en la capacidad de producción de iones por unidad de tiempo, pero no en la producción de iones por unidad de tiempo y por unidad de superficie, que debe ser tarea realizada por el usuario. No obstante, necesitamos un flujo mínimo de iones de 602 732 669 iones/(s·cm<sup>2</sup>), para poder emular en tiempo real el daño neutrónico de un reactor de fusión. Debemos entonces proceder en primer lugar, a la selección del área de irradiación sobre la muestra, para que una vez focalizado el haz sobre dicha zona, y determinada la velocidad de generación de daño deseada (parámetro  $\kappa$ ), tengamos determinada la capacidad producción de iones necesaria en el *ciclotrón*.

En la estimación de este área, debe tenerse en cuenta que la máxima penetración que puede alcanzar un ión de hierro de 400 MeV, en un material del mismo elemento, es tan solo de 27,73  $\mu\text{m}$  (cálculo realizado con *TRIM*). El uso de muestras de reducidas

dimensiones podría ser un inconveniente para su fácil manipulación, por lo que sería recomendable establecer un tamaño mínimo de 2 cm de la lado para las muestras cuadradas. «Siguiendo por esta vía», podríamos establecer un área de irradiación, para el haz de iones sobre la muestra, al equivalente a un cuadrado de 1,5 cm de lado, es decir, un área,  $S$ , de 2,25 cm<sup>2</sup>. Teniendo esto en cuenta y el flujo mínimo de iones de 400 MeV de 602 732 669 iones/(s·cm<sup>2</sup>), ya comentado, gracias a la ecuación C-28 podemos obtener la ecuación C-29, que proporciona la corriente eléctrica necesaria,  $J$ , que debe suministrar desde el *ciclotrón*. Supondremos que en el *ciclotrón* no existe ganancia ni pérdida de masa, por lo que esta corriente eléctrica también es referida a la *fuentes de iones ECRIS*.

$$J = IS = 2,172\,789\,248 \cdot 10^{-4} \cdot Z\kappa \quad (\text{C-29})$$

donde,

$J$ , es la intensidad de corriente eléctrica que debe proceder del *ciclotrón*, expresada en microamperios.

$S$ , es la proyección del haz de iones sobre un plano perpendicular a la dirección de su movimiento, expresada en centímetros cuadrados.

Tanto las *fuentes de iones* como los *ciclotrones*, son equipos costosos, que requieren de alta precisión y calidad. Por este motivo, y por que su aplicación suele estar restringida a usos muy específicos, no existe una amplia oferta de diseñadores ni tampoco suministradores. Entonces, para nuestros cálculos, sería recomendable tomar como referencia a empresas con reconocida experiencia y fiabilidad. La empresa *Panttechnik* es una de ellas, no obstante, el uso de sus equipos está avalado por una de la empresas líderes en el diseño y construcción de *ciclotrones*, la empresa *IBA*. Tomaremos entonces como referencia las características de las *fuentes de iones* de *Panttechnik*.

Esta empresa suele comercializar tres máquinas como *fuentes de iones*, cuyos nombres «en clave» son *Nanogan*, *Supernanogan* e *Hypernanogan*. *Panttechnik* no ha realizado pruebas para la producción de iones de hierro, por lo que no puede certificar estas condiciones de uso, pero puede estimarse su valor como la tercera parte de los valores referentes al

argón, siempre y cuando se emplee la técnica *MIVOC* con *ferroceno*<sup>7</sup>. En la tabla C.1-3 están representadas las corrientes eléctricas de iones de hierro, que las tres máquinas podrían suministrar, en función del estado de carga eléctrica de sus iones.

**Tabla C.1-3:** Corrientes eléctricas de iones de hierro, en función de sus estados de carga, suministradas por las fuentes de iones Nanogan, Supernanoga e Hypernanogan, de la empresa Pantechnik.

Estado de carga	corrientes eléctricas en microamperios									
	+1	+2	+4	+6	+8	+9	+11	+12	+14	+15
<b>Nanogan</b>	100,00	-	46,67	15,00	13,33	3,33	0,33	-	-	-
<b>Supernanogan</b>	333,33	116,67	83,33	66,67	66,67	30,00	10,00	-	0,33	-
<b>Hypernanogan</b>	-	-	-	-	166,67	-	40,00	16,67	3,33	3,33

*Datos suministrados por la empresa Pantechnik.*

Introduciendo los datos de la tabla C.1-3 en la ecuación C-29, obtenemos la capacidad de aceleración del daño neutrónico,  $\kappa$ , que sería capaz de producir cada una de las corrientes eléctricas,  $J$ , es decir, el número de veces en que podríamos aumentar la *tasa de aumento de generación de daño* con respecto caso real de un reactor de fusión. Los resultados se representan en la tabla C.1-4.

**Tabla C.1-4:** Parámetro de aumento de la tasa de generación de daño,  $\kappa$ , por iones de hierro producidos en las diferentes fuentes de iones de Pantechnik.

Estado de carga	datos sin dimensiones									
	+1	+2	+4	+6	+8	+9	+11	+12	+14	+15
<b>Nanogan</b>	460 238	-	53 694	11 506	7671	1705	139	-	-	-
<b>Supernanogan</b>	1 534 126	268 472	95 883	51 138	38 353	15 341	4184	-	110	-
<b>Hypernanogan</b>	-	-	-	-	95 883	-	16 736	6392	1096	1023

*Manipulación de datos suministrados por la empresa Pantechnik.*

La tabla C.1-4 proporciona información suficiente para la selección de la *fuentes de iones*, pues para una determinada *tasa de aumento de generación real de daño*,  $\kappa$ , bastaría seleccionar la máquina más barata. Pero la dependencia con el estado de carga de ión, como también se puede apreciar en esta tabla, tiene una importante influencia sobre el coste del ciclo-

<sup>7</sup>Recomendación por comunicación privada mantenida con Antonio C. C. Villari, *Chief Technical & Marketing Officer*. de Pantechnik.

trón, posiblemente superior al coste de la *fente de iones*, por lo que debemos vincular su dimensionamiento y selección al del *ciclotrón*.

En cuanto a la fuente material de iones, usaremos *ferroceno* ( $Fe(C_5H_5)_2$ ) num. CAS 102-54-5, como compuesto de entrada, mediante la técnica *MIVOC*. Las especificaciones de este compuesto, así como sus recomendaciones de uso en materia de seguridad, pueden consultarse en el ANEXO D (pág. 221). Adicionalmente, en la figura C.1-10 puede observarse la disposición geométrica tridimensional de la molécula de *ferroceno*, así como también una fotografía del citado compuesto, que como ya se ha comentado, aunque su presión de vapor sea elevada con respecto al *alto vacío*, no lo es para las condiciones atmosféricas, por lo que permanece en estado sólido en estas condiciones. Como referencia al coste a asignar a este compuesto dentro del proyecto, en la tabla C.1-5 quedan recogidos los precios en destino, ofertados por la empresa *Spectrum Chemicals Mfg. Corp*<sup>8</sup>, así como también los precios *FOB*<sup>9</sup> de la empresa *Pressure Chemical Co.*<sup>10</sup> en su planta de *Pittsburgh*.

**Tabla C.1-5:** Precios del ferroceno ofertados por Spectrum Chemicals Corp. y Pressure Chemical Co.

Masa, en gramos	25	100	500	1000	10 000	25 000	100 000
Precio <i>Spectrum Ch. Co.</i> , en USD	32,15	74,90	213,45	-	-	3687,30	-
Precio <i>Pressure Ch. Co.</i> , en USD <i>FOB</i>	-	-	-	43,00	370,00	-	2300,00

Datos obtenidos de websites comerciales o en comunicaciones privadas.

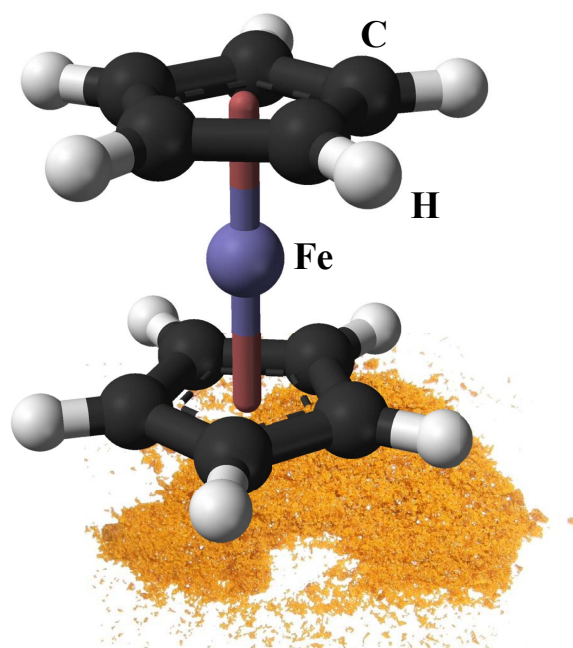
### C.1.7 SELECCIÓN GENERAL DE CICLOTRÓN ISÓCRONO

La necesidad de un acelerador de dimensiones reducidas (relativamente), descarta la selección de un *acelerador lineal (linac)*. Por otro lado, la energía cinética requerida para los iones de haz, impide la selección de un *ciclotrón clásico*, pues la acumulación de los efectos

<sup>8</sup>Precios tomados de la website comercial.

<sup>9</sup>Precio que solamente incluye el coste del producto y su transporte a puerto marítimo, sin tener en cuenta el flete ni tampoco su seguro.

<sup>10</sup>Precios obtenidos por comunicación privada con uno de sus comerciales



*Disposición tridimensional de la molécula de ferroceno propiedad de Benjah, cedida al dominio público. Fotografía de muestra sólida de ferroceno propiedad de TMaster, cedida al dominio público.*

**Figura C.1-10:** Disposición tridimensional de la molécula de ferroceno  $Fe(C_5H_5)_2$  y fotografía de una muestra a presión atmosférica (sólida).

relativistas, órbita tras órbita, comienza a ser significativa. Por todo ello, la selección recae en un *ciclotrón isócrono*.

En el ANEXO B (pág. 154) se comprobó que los parámetros más importantes para la emulación del *daño primario*, son la intensidad del haz y la energía cinética de sus iones. El primero está relacionado con la *tasa de desplazamientos por átomo* generados, mientras que el segundo lo está con la penetración longitudinal del daño generado en la muestra de estudio. Aunque la intensidad del haz de iones esté determinada la tecnología usada de la *fuentes de iones*, tiene gran impacto en el acelerador, pues determina la potencia necesaria a la que este debe ser alimentado. Sin embargo, el parámetro que si está estrechamente relacionado con el diseño del acelerador, es la energía cinética requerida para el haz de iones. Por tanto, centraremos el dimensionamiento del acelerador en esta energía cinética, y con ella, podrán obtenerse los diferentes parámetros de diseño y de operación.



La velocidad,  $\vec{v}$ , de una partícula que describe una órbita circular de radio  $R$ , sometida a un campo magnético de *densidad de flujo magnético*  $\vec{B}$ , perpendicular a dicha velocidad, si no se tienen en cuenta los efectos relativistas, puede obtenerse de la ecuación C-12. Según la *mecánica clásica*, la *energía cinética* de una partícula,  $E_{NR}$ , ecuación C-30, es proporcional al cuadrado del valor de su velocidad,  $|\vec{v}|^2$ , siendo la masa en reposo,  $m_o$ , la constante de proporcionalidad.

$$E_{NR} = \frac{1}{2}m_o|\vec{v}|^2 = \frac{1}{2}m_o \left( \frac{qR|\vec{B}|}{m_o} \right)^2 = K_o \cdot K_d \quad (C-30)$$

donde,

$E_{NR}$ , es la *energía cinética no relativista* de la partícula acelerada, expresada en julios.

$m_o$ , es la *masa en reposo* de la partícula, que tiende a su masa cuando su energía tiende a cero, expresada en kilogramos.

$|\vec{v}|$ , es el *valor de la velocidad* de la partícula, expresado en metros por segundo.

$q$ , es la *carga eléctrica* de la partícula, expresada en coulombs.

$R$ , es el *radio de curvatura* de la trayectoria descrita por la partícula, expresado en metros.

$|\vec{B}|$ , es la *densidad de flujo magnético* existente, expresas en teslas.

Si identificamos el radio de curvatura de la última de las trayectorias de la partícula acelerada, con la mínima dimensión radial que debe tener el *ciclotrón*, entonces en la ecuación C-30, se puede identificar un factor, dependiente de los parámetros de diseño del *ciclotrón*,  $K_d$ , ecuación C-32, es decir, el mínimo radio de la máquina,  $R$ , y la *densidad de flujo magnético*,  $\vec{B}$  (tal y como se anticipó en el subapartado C.1.1.5 (pág. 184) ); y un factor dependiente de los parámetros de operación,  $K_o$ , ecuación C-31, es decir, de la naturaleza de la partícula acelerada, concretamente su masa,  $m_o$ , y su carga eléctrica,  $q$ .

$$K_o = \frac{Z^2}{A} \quad (C-31)$$

donde,

$K_o$ , es un *factor dependiente* de los parámetros de operación del *ciclotrón isócrono*, sin dimensiones.

$Z$ , es *número de cargas eléctricas elementales* de la partícula acelerada, sin dimensiones.

$A$ , es el *número de nucleones* que posee el núcleo de la partícula acelerada, sin dimensiones.

$$K_d = \frac{e^2}{2g} \left( R |\vec{B}| \right)^2 = C_1 \left( R |\vec{B}| \right)^2 \quad (\text{C-32})$$

donde,

$K_d$ , es un factor dependiente de los parámetros de diseño del ciclotrón isócrono, expresando en julios.

$e$ , es la carga eléctrica que posee una carga elemental, y equivale a  $1,602\,176\,487 \cdot 10^{-19}$  C.

$g$ , es la masa media que posee un nucleón en el núcleo de la partícula considerada, que se obtiene de la expresión  $(N_p m_p + N_n m_n) / (N_p + N_n)$ , pero que para un núcleo formado por el mismo número de protones que de neutrones, y sin considerar los efectos relativistas debidos a la energía de enlace, tiene un valor de  $1,673\,774\,464 \cdot 10^{-27}$  kg.

$N_p$  y  $N_n$ , son el número de protones y de neutrones existentes en el núcleo de la partícula acelerada, respectivamente, sin dimensiones.

$m_p$  y  $m_n$ , son la masa de un protón y de un neutrón en el núcleo del átomo acelerado, respectivamente, expresados en kilogramos.

$R$ , es el mínimo radio que debe tener el ciclotrón isócrono, expresado en metros.

$|\vec{B}|$ , es el valor de la densidad de flujo magnético aplicada en el ciclotrón isócrono, expresado en teslas.

$C_1$ , es una constante que equivale a  $e^2/(2g)$ , y tiene un valor de  $3,067\,282\,422 \cdot 10^{-11}$  J/(m·T)<sup>2</sup>.

Si se desea expresar el factor  $K_d$  en megaelectronvoltios, debe usarse la constante  $C_1 = 47,861\,156\,88$  MeV/(m·T)<sup>2</sup>. Entonces la energía cinética a la que serán aceleradas las partículas,  $E_{NR}$ , teniendo en cuenta que estamos despreciando los efectos relativistas, ecuación C-33, depende un factor  $K_o$ , que es función de la *fente de iones* que usemos en cada momento, y de un factor de diseño de diseño del *ciclotrón*,  $K_d$ . Queda de manifiesto la importancias de la *fente de iones* en la energía cinética final del haz de iones.

$$E_{NR} = K_o \cdot K_d \quad (\text{C-33})$$

Antes de continuar con el dimensionamiento del *ciclotrón*, debiera ser interesante comprobar que la ecuación C-33 es válida en nuestro rango de energías, es decir, comprobar, si al contrario de como ocurrió en el apartado C.1.3 (pág. 189) , si que pueden despreciarse los efectos relativistas. Procedamos entonces a desarrollar una expresión para la energía cinética relativista,  $E_R$ , en función de los parámetros del *ciclotrón*. Según la *teoría especial de la relatividad* [22], el vador del momento cinético,  $|\vec{p}|$ , de una partícula, y sus energía total,  $E_t$ , vienen dados por las ecuaciones C-34 y C-35, respectivamente.

$$|\vec{p}| = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} |\vec{v}| \quad (\text{C-34})$$

donde,

$|\vec{p}|$ , es el valor del momento cinético de la partícula, expresado en newtons segundos

$$E_t = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} c^2 \quad (\text{C-35})$$

donde,

$E_t$ , es la energía total de la partícula, expresas en julios.

$c$ , es la velocidad de la luz en el vacío,  $299\,792\,458 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ , según la recomendación de la XV Conferencia General de Pesos y Medidas de 1975 [47], adoptada por el Sistema Internacional de Unidades, declarado de uso legal en España por el Real Decreto 1317/1989 [9]

Despejando el cuadrado del valor de la velocidad,  $|\vec{v}|^2$ , de la ecuación C-34, obtenemos la ecuación C-36. Si introducimos la ecuación C-36 en la ecuación C-35, tenemos una nueva expresión para la energía total de la partícula,  $E_t$ , ecuación C-37.

$$|\vec{v}|^2 = \frac{c^2}{(m_0^2 c^2) / p^2 + 1} \quad (\text{C-36})$$

$$E_t = \sqrt{c^2 p^2 + m_0^2 c^4} \quad (\text{C-37})$$

Sin embargo, la energía total de una partícula,  $E_t$ , es la suma de la energía cinética relativista,  $E_R$ , en la energía en reposo,  $m_0 c^2$ . Teniendo esto en cuenta en la ecuación C-37, y despejando la energía cinética relativista,  $E_R$ , tenemos la ecuación C-38, en la que se ha suprimido la solución negativa para la energía.

$$E_R = -m_0 c^2 + \sqrt{m_0^2 c^4 + p^2 c^2} \quad (\text{C-38})$$

donde,

$E_R$ , es la energía cinética relativista, expresada en julios.

De las ecuaciones C-27 y C-34, se deduce la ecuación C-39. Sustituyendo la expresión del valor del momento cinético,  $|\vec{p}|$ , de la ecuación C-39 en la ecuación C-38, tenemos

una expresión para la energía cinética relativista,  $E_R$ , en función de los parámetros de operación y de diseño del *ciclotrón*, ecuación C-40.

$$|\vec{p}| = qR|\vec{B}| \quad (\text{C-39})$$

$$E_R = -m_0c^2 + \sqrt{m_0^2c^4 + q^2c^2 \left(R|\vec{B}|\right)^2} \quad (\text{C-40})$$

Teniendo en cuenta el número de nucleones y de cargas elementales de la partícula, y sustituyendo las constantes por sus valores numéricos, podemos expresar la ecuación C-40 por la ecuación C-41.

$$\begin{aligned} E_R &= -Agc^2 + \sqrt{A^2g^2c^4 + Z^2e^2c^2 \left(R|\vec{B}|\right)^2} \\ &= -AC_2 + \sqrt{A^2C_2^2 + Z^2 \left(R|\vec{B}|\right)^2 C_3^2} \end{aligned} \quad (\text{C-41})$$

donde,

$E_R$ , es la energía cinética relativista, expresada en julios.

$C_2$ , es una constante que equivale a  $gc^2$ , y tiene un valor de  $1,504\,313\,468 \cdot 10^{-10}\text{J}$ .

$C_3$ , es una constante que equivale a  $ec$ , y tiene un valor de  $4,803\,204\,272 \cdot 10^{-11}\text{J}/(\text{m}\cdot\text{T})$ .

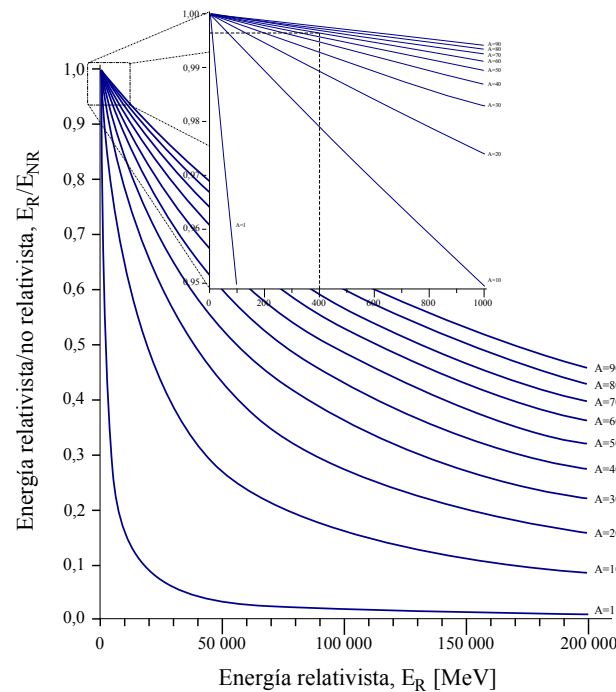
Si se quiere expresar la energía cinética relativista,  $E_R$ , de la ecuación C-41 en *megaelectron-voltios*, deben usarse las constantes  $C_2 = 938,918\,208\text{ MeV}$  y  $C_3 = 299,792\,300\,3\text{ MeV}/(\text{m}\cdot\text{T})$ .

Una vez tenemos una expresión para la energía cinética predicha por la *teoría especial de la relatividad*,  $E_R$ , en función de los parámetros del *ciclotrón*, ecuación C-41, estamos en condiciones de compararla con la energía cinética predicha por la *mecánica clásica*,  $E_{NR}$ , ecuación C-33. Para ello, sustituimos el valor de los parámetros de diseño,  $R|\vec{B}|$ , de la ecuación C-33 en la ecuación C-41, y hallamos la relación entre las energías cinéticas, tal y como se muestra en la ecuación C-42

$$\frac{E_R}{E_{NR}} = \frac{AC_3^2/C_1}{E_R + 2AC_2} \quad (\text{C-42})$$

El valor de la relación de la ecuación C-42 está comprendido entre cero y uno, puesto que la energía cinética predicha por la *teoría de la relatividad* es siempre menor que la predicha

por la *mecánica clásica*, debido a la inercia que impone el aumento de masa una partícula con su velocidad. Utilizando los valores correspondientes a *megaelectronvoltios*, de las constantes de la ecuación C-42, podemos representar esta ecuación en la figura C.1-11. En esta figura puede apreciarse que para las máximas energías alcanzadas en el presente proyecto, es decir, 400 MeV, la relación entre las energías cinética, relativista y no relativista, para el isótopo-56 del hierro ( $A = 56$ ), es de 99,62 %, por lo que se puede considerar como válido, despreciar los efectos relativistas para este caso, siempre y cuando estemos en la fase de selección, de los parámetros generales de diseño del *ciclotrón*.



Propiedad de Jesús P. de Vicente, cedida al dominio público.

**Figura C.1-11:** Relación entre la energía cinética de las partículas aceleradas en un ciclotrón, para el caso del cálculo relativista y el caso del cálculo no relativista.

Si entonces, aceleramos átomos del isótopo-56 del hierro hasta la energía cinética máxima de 400 MeV, el uso de la *fente iónica* de menor poder de ionización (una sola carga elemental) arrojaría los factores  $K_o = 0,001\,786$  y  $K_d = 22\,400$  MeV. En consecuencia, el producto de los factores de diseño  $R|\vec{B}|$ , tendría un valor de 21,63 m·T, que es excesivamente elevado si se requiere una instalación compacta y no muy costosa, pues para una

campo magnético de densidad de flujo magnético de 1 T, el *ciclotrón* necesitaría tener un diámetro mínimo de 43,26 m.

En el otro extremo, puede utilizarse la *fuentes iónica* de mayor poder de ionización, que podría conseguir un máximo de veintiséis cargas elementales en el isótopo-56 del hierro. Este máximo es debido a que en este caso, la ionización se llevaría a cabo despojando al isótopo de todos sus electrones, quedando libres de apantallamiento sus veintiséis protones, pues en el caso contrario, el de la adición de electrones sobre el átomo neutro, queda descartada la opción cuando el número de cargas elementales que se pretende conseguir es elevado, ya que la energía orbital de los electrones adicionales sería prácticamente despreciable, no pudiendo considerarse entonces que pertenecieran al átomo. En cualquier caso, el factor  $K_o$  tendría un valor de 12,07, y en consecuencia  $K_d = 33,14$  MeV. El producto de los factores de diseño del *ciclotrón*,  $R|\vec{B}|$ , sería ahora 0,8321 m·T, que permitiría el uso un *ciclotrón* de bajo campo magnético y pequeñas dimensiones, y en consecuencia muy barato.

Hemos de llegar por tanto, a una solución de compromiso entre la *fuentes de iones*, que es la responsable del estado de carga,  $Z$ , y los parámetros de diseño del *ciclotrón* (tamaño  $R$  y campo magnético  $|\vec{B}|$ ). Donde parece ser que la solución recaería en un correspondiente estudio de costes.

Partiremos de la suposición de que nuestra *tasa de aumento en la generación de daño*,  $\kappa$ , debiera estar comprendida entre la unidad de millar y la decena de millar. Esta suposición, no fundamentada muy sólidamente, se ha establecido como medida preventiva, pues una tasa de generación de daño mayor podría desvirtuar el objetivo de la emulación, no ajustándose el daño primario generado, así como su correspondiente evolución, al generado por los neutrones en un reactor de fusión. No obstante, *tasas de aumento de generación de daño*,  $\kappa$ , requerirían de estados de carga,  $Z$ , tan reducidos, que encarecerían el coste del *ciclotrón* en demasía. Entonces, según la tabla C.1-4, las *tres fuentes de iones* de la empresa *Panttechnik* podrían ser viables para los estados de carga mostrados en la tabla C.1-6. En esta nueva tabla además pueden apreciarse para los estados de carga dados, los correspondientes valores del factor de diseño,  $K_d$ , calculados con la ecuación C-

33, siendo particularizada para iones del isótopo-56 del hierro acelerados a 400 MeV. Aunque no los hayamos tenido en cuenta, cualquiera que sea la *fente de iones* finalmente seleccionada, siempre es posible disminuir el valor de la intensidad para reducir la *tasa de aumento de generación de daño*,  $\kappa$  si se desea.

**Tabla C.1-6:** Valores de la tasa de aumento de generación de daño,  $\kappa$  de los estados de carga de las fuentes de iones Pantechnik que reúnen el requisito de proporcionar que este valor de tasa esté comprendido entre la unidad de millar y la decena de millar. Factor de diseño,  $K_d$ , para los diferentes estados de carga.

Estado carga	$K_d$ en megaelectronvoltios	valores de $\kappa$ sin dimensiones		
		Nanogan	Supernanogan	Hypernanogan
+8	350	7671	-	-
+9	277	1705	-	-
+11	185	-	4184	-
+12	156	-	-	6392
+14	114	-	-	1096
+15	100	-	-	1023

Datos obtenidos de manipulación de tabla C.1-4.

La suposición anterior, ha reducido el abanico de selección a seis configuraciones de *ciclotrón* (correspondientes cada una de ellas a un estado de carga,  $Z$ , determinado). Además, a cada una de estas configuraciones, se ha asociado una única *fente de iones* de la empresa *Pantechnik*. Realicemos un simple estudio de costes para cada una de estas opciones.

El principal coste de fabricación de un *ciclotrón* (no se tienen en cuenta los costes de diseño) es el relativo al material magnético, concretamente el empleado en el núcleo y en los polos. Una forma simple, pero grosera, de estimar la cantidad necesaria de material magnético, es la propuesta por W. Joho [107], representada por la ecuación C-43.

$$M = 5000 (K_d/1000)^{3/2} \quad (\text{C-43})$$

donde,

$M$ , es la masa de material magnético necesaria para obtener un factor de diseño,  $K_d$  determinado, expresada en toneladas.

$K_d$ , es el facto de diseño del ciclotrón, expresado en megaelectronvoltios.

Por otro lado, el material magnético debe ser aquel que tenga buenas propiedades magnéticas, y sea susceptible de ser producido en grandes cantidades. Es el caso del acero, pues su contenido en hierro le proporciona las propiedades buscadas. No obstante, acero hay de muchos tipos, y el más recomendable es el acero bajo en carbono, concretamente por debajo de 0,1 % en peso, y bajo en impurezas, tal y como indica S. Zaremba [108]. En cuanto a las propiedades mecánicas y térmicas, el acero seleccionado debe reunir las recogidas por T. Zhang [109], que se han reimpreso en la tabla C.1-7. De todas estas propiedades, la de mayor importancia es la composición, concretamente el porcentaje en peso de hierro, que será el que proporcionará las propiedades magnéticas. El acero que mejor podría reunir estas propiedades, en especial su composición, sería el acero ASTM-A 1008, normalizado por la norma ASTM A 1008/A 1008M 04 [12], en especial el correspondiente a la designación *EDDS*. Este acero suele comercializarse enrollado, y en función del espesor de la lámina hemos encontrado tres precios<sup>11</sup> *FOB*, a saber, a) 9685 EUR/t para espesor de 0,61 mm, b) 6492 EUR/t para espesor de 0,91 mm y c) 5182 EUR/t para espesor de 1,52 mm. Seleccionamos el precio correspondiente al menor espesor, pues se trata de la mejor opción para evitar defectos materiales en la elaboración del núcleo y de los polos, pues cuanto menor sea el espesor de las láminas arrolladas, menor es la tensión generada debida a la diferencia de curvaturas entre las caras externa e interna.

**Tabla C.1-7:** Composición y propiedades magnéticas y térmicas requeridas para un acero de uso como material magnético 5 en el núcleo y los polos de un ciclotrón.

Composición	C	Mn	P	S	N	Al	Mo	Ni	Fe
en porcentaje	0,005-0,08	0,20-0,40	<0,03	<0,02	<0,01	<0,1	<0,02	<0,03	>99,2
Densidad	Coef. Poisson		Mód. elástico		Resis. Tracción		Lím. Elástico		
en kilogramos por metro cúbico			en gigapascals		en megapascals		en megapascals		
7871	0,27-0,30		190-210		340		285		
Conduct. térmica	Calor específico			Resistiv. Eléctrica					
en vatios por metro por kelvin	en julios por kilogramo por kelvin			en vatios metro					
59,5	481			130·10 <sup>-9</sup>					

Datos tomados de T. Zhang [109].

<sup>11</sup>Precios suministrados en diciembre de 2009 por la división *Copper & Brass Sales* perteneciente al grupo *ThyssenKrupp Materials NA*. Se trata del mayor fabricante de productos planos de acero, por lo que tiene garantizado el cumplimiento de las más altas exigencias de calidad y precisión. Motivo por el que la hemos seleccionado como referencia.



Entonces estamos en condiciones de estimar la cantidad de material magnético necesaria para cada una de las opciones de la tabla C.1-6, así como también su coste. La suma de estos costes y el coste de las *fuentes de iones*<sup>12</sup>, correspondientes a cada opción, vienen recogidos en la tabla C.1-8.

**Tabla C.1-8:** Evaluación de costes de material magnético, suponiendo 9685 EUR/t en acero ASTM-A-1008. Costes de las fuentes de iones. Coste total por unidad de tasa de aumento de generación de daño,  $\kappa$ .

Estado carga	$K_d$ en megaelectronvoltios	Cant. acero en toneladas	Coste acero en millones euros	Coste f. iones en miles euros	Coste total en millones euros	Coste por $\kappa$ en euros
+8	350	1035	10,027	90	10,117	1319
+9	277	727	7,042	90	7,132	4184
+11	185	398	3,857	240	4,097	979
+12	156	307	2,971	350	3,321	520
+14	114	193	1,871	350	2,221	2027
+15	100	157	1,521	350	1,871	1830

*Datos obtenidos de Copper & Brass Sales y Pantechnik.*

Analizando los datos de la tabla C.1-8, conviene seleccionar la opción que menor coste por unidad de *tasa de aumento de generación de daño*,  $\kappa$ , presente. Se trata de la opción que acelera iones con estado de carga +12 hasta la energía de 400 MeV. El *ciclotrón* correspondiente a esta opción tendría un factor de diseño,  $K_d$ , de valor 155,556 MeV, por lo que el producto del campo magnético,  $|\vec{B}|$ , y el radio efectivo,  $R$ , según la ecuación C-32 tendría un valor de 1,802 815 018 m·T. El factor de operación,  $K_o$  para conseguir la energía deseada, según la ecuación C-33, debiera ser de 2,571. Evidentemente, este último factor puede ser modificado (y lo será), en función de la especie iónica y el estado de carga de otra partícula diferente al hierro que se desee acelerar. El tal caso, solamente sería necesario un estudio correspondiente a la nueva intensidad que emularía el daño neutrónico. El coste de las 307 t de material magnético, necesarias para el desarrollo de este ciclotrón, asciende a 2,971 MEUR.

<sup>12</sup>Precios suministrados en comunicación privada mantenida con Antonio C. C. Villari, *Chief Technical & Marketing Officer* en diciembre de 2009. de Pantechnik.

La *fente de iones* necesaria sería la opción *Hypernanogan*, comercializada por la empresa *Pantchnik*, con un coste de 350 kEUR. La máxima intensidad de iones de hierro con estado de carga +12 que podría proporcionar esta fuente, sería de  $\approx 17 \mu\text{A}$ .

Entonces en estas condiciones, el conjunto podría aumentar la tasa de generación del *daño primario*, respecto al producido en tiempo real en un reactor de fusión, en un factor  $\kappa = 6392$ .

## C.2 ACELERADOR DE IONES LIGEROS

El selección y dimensionamiento de los aceleradores lineales se propone como fuera de los alcances del presente proyecto.

No obstante, se recomienda la selección de dos aceleradores lineales electrostáticos. Uno de ellos para la aceleración de iones del isótopo-1 hidrógeno, mientras que el otro para la aceleración de iones del isótopo-4 del helio.

La función de ambos es emular la generación de iones hidrógeno y helio, producidos en las reacciones nucleares de los neutrones de 14 MeV con el isótopo-56 del hierro, tal y como se indica en el subapartado A.2.1.2 (pág. 109) .

ANEXO D

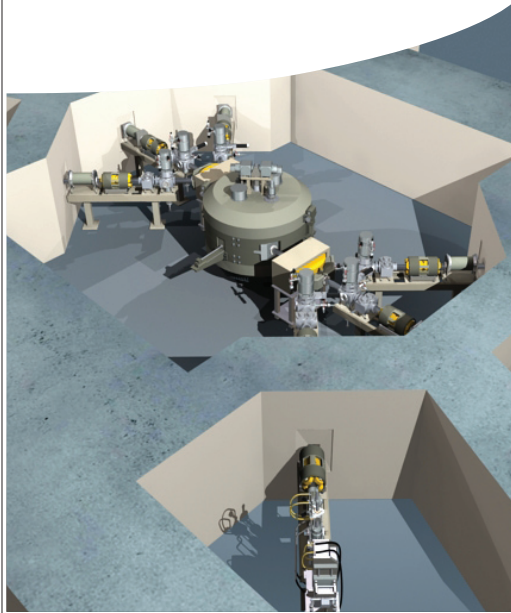
## **CATÁLOGOS**



Cyclone® 70

**Multiparticle high energy industrial cyclotron**

**Product description**



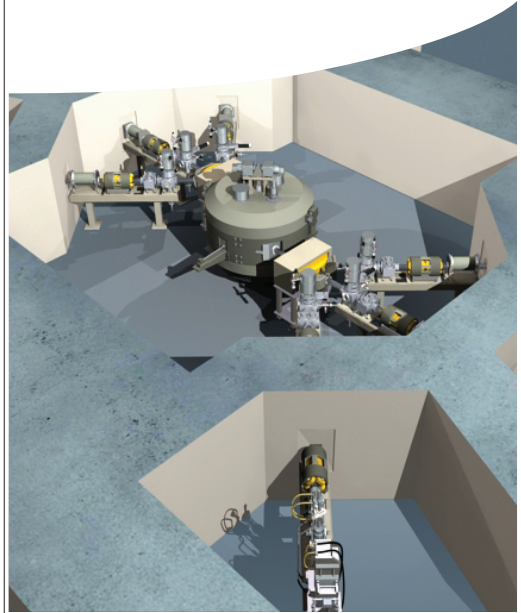
[www.iba-worldwide.com](http://www.iba-worldwide.com)



Cyclone® 70

**Multiparticle high energy industrial cyclotron**

**Product description**



[www.iba-worldwide.com](http://www.iba-worldwide.com)



## Table of contents

1. Main features and benefits .....	7
2. Technical description .....	9
2.1. Beam characteristic .....	10
2.2. System overview .....	10
2.3. Magnet System .....	12
2.4. Adjustment of the main magnetic field .....	13
2.5. Ion Source .....	14
2.5.1. Arc multicusp ion source for negative ions .....	14
2.5.2. Multicusp Source (IBA) .....	15
2.5.3. ECR Source for positive ions .....	16
2.5.4. SUPERNANOAN ion source (Panteknik) .....	16
2.5.5. R.F. System .....	18
2.5.6. Low level rack .....	19
2.5.7. 5 kW amplifier .....	20
2.5.8. Final Amplifier .....	20
2.5.9. Extraction System .....	21
2.5.10. Diagnostic Probe .....	22
2.5.11. Control System .....	22
2.5.12. Interlocks .....	25
2.5.13. Safety feature .....	25
2.5.14. Control system options .....	25
2.5.15. Safety Issues .....	25
2.5.16. Vacuum System .....	28
2.5.17. Lifting system .....	28
2.5.18. Cooling system .....	29
2.5.19. Power Requirements .....	29
2.5.20. Cyclone® 70 performances and maintenance .....	30
3. Cyclone® 70 Cyclotron: Specifications .....	31
3.1. Beam Characteristics .....	31
3.2. Typical Total Power Consumption .....	32
3.3. Cyclotron dimensions and weight .....	32
3.4. Magnet Structure .....	32
3.5. Control System .....	32
3.6. R.F. System .....	32
3.7. Ion Source .....	33
3.8. Main vacuum tank .....	33
4. Beam Transport System .....	35
4.1. Standard Layout .....	35
4.2. Beam line Control system and library .....	36
4.3. Connection to a target .....	36
5. Solid Target System .....	39
5.1. Introduction .....	39
5.2. Description .....	39
5.2.1. Sequence of Operations of carrier .....	39
5.2.2. Control System .....	40
5.3. Scope of Supply .....	41

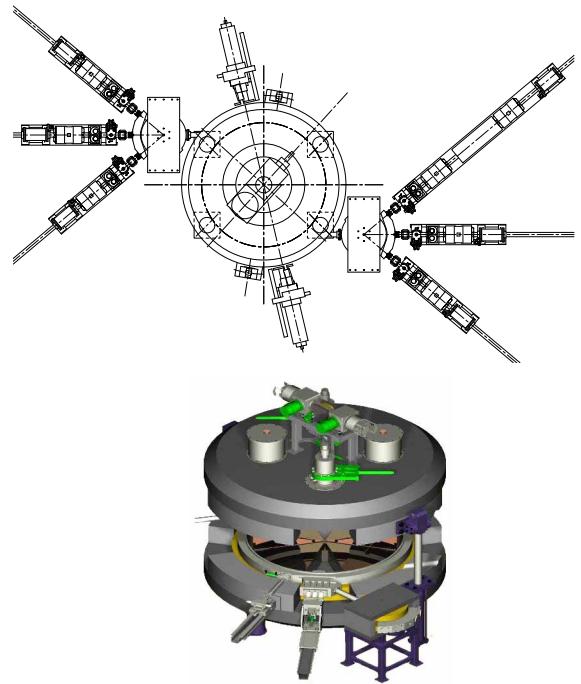
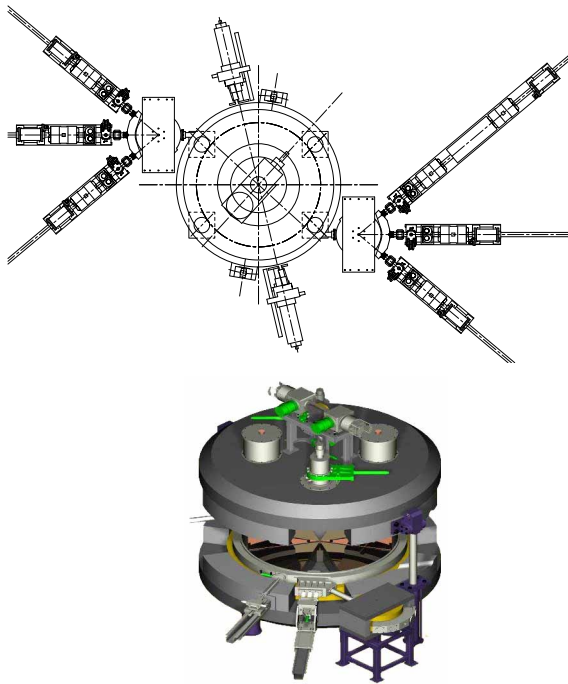


## Table of contents

1. Main features and benefits .....	7
2. Technical description .....	9
2.1. Beam characteristic .....	10
2.2. System overview .....	10
2.3. Magnet System .....	12
2.4. Adjustment of the main magnetic field .....	13
2.5. Ion Source .....	14
2.5.1. Arc multicusp ion source for negative ions .....	14
2.5.2. Multicusp Source (IBA) .....	15
2.5.3. ECR Source for positive ions .....	16
2.5.4. SUPERNANOAN ion source (Panteknik) .....	16
2.5.5. R.F. System .....	18
2.5.6. Low level rack .....	19
2.5.7. 5 kW amplifier .....	20
2.5.8. Final Amplifier .....	20
2.5.9. Extraction System .....	21
2.5.10. Diagnostic Probe .....	22
2.5.11. Control System .....	22
2.5.12. Interlocks .....	25
2.5.13. Safety feature .....	25
2.5.14. Control system options .....	25
2.5.15. Safety Issues .....	25
2.5.16. Vacuum System .....	28
2.5.17. Lifting system .....	28
2.5.18. Cooling system .....	29
2.5.19. Power Requirements .....	29
2.5.20. Cyclone® 70 performances and maintenance .....	30
3. Cyclone® 70 Cyclotron: Specifications .....	31
3.1. Beam Characteristics .....	31
3.2. Typical Total Power Consumption .....	32
3.3. Cyclotron dimensions and weight .....	32
3.4. Magnet Structure .....	32
3.5. Control System .....	32
3.6. R.F. System .....	32
3.7. Ion Source .....	33
3.8. Main vacuum tank .....	33
4. Beam Transport System .....	35
4.1. Standard Layout .....	35
4.2. Beam line Control system and library .....	36
4.3. Connection to a target .....	36
5. Solid Target System .....	39
5.1. Introduction .....	39
5.2. Description .....	39
5.2.1. Sequence of Operations of carrier .....	39
5.2.2. Control System .....	40
5.3. Scope of Supply .....	41

5.3.1. Irradiation Station .....	41
5.3.2. Receiving Station .....	41
5.3.3. Pneumatic Transport System (Rabbit System) .....	41
5.3.4. Control Unit .....	41
5.3.5. Penetration Dimensions .....	41
5.4. Solid Target System Specifications .....	43
6. Building Requirements .....	45
6.0.1. Cyclotron Vault .....	45
6.0.2. Target Vault .....	45
6.0.3. Power Supply Room .....	46
6.0.4. Cyclotron Cooling System room .....	46
6.0.5. Cryopump Compressor .....	46
6.1. Utility Specifications .....	46
6.1.1. Electrical Power .....	46
6.1.2. Cooling Water Requirements .....	47
6.1.3. Compressed Air for Valve Action .....	47
6.1.4. Dry Nitrogen for Cyclotron and Ion Source Venting .....	47
6.1.5. Gases for Ion Source: hydrogen, deuterium, helium .....	47
6.2. Building Completion Specifications .....	48
6.2.1. Concrete .....	48
6.2.2. Pipes and Cables .....	48
6.2.3. Utilities .....	48
6.2.4. Chiller Loop Cooling Connections .....	48
6.2.5. Dust .....	48
6.2.6. Lighting and Electrical Equipment Power .....	49
6.2.7. Compressed Air Outlets .....	49
6.2.8. Power Supply and Control Room Flooring .....	49
6.2.9. Ventilation .....	49
6.2.10. Heating .....	49
6.2.11. Radiation Protection .....	49
6.2.12. Infrastructure & Services .....	49
6.2.13. Communication and Surveillance Equipment .....	50
6.2.14. Insertion of the Supplies .....	50
6.2.15. Consulting Services .....	50
7. Spare Parts & Customer Service .....	53
7.1. Importance of the Customer Services .....	53
7.2. Customer Services Organization .....	53
7.3. Maintenance Contract/Service Agreement .....	53
8. Documentation .....	55
8.1. Documentation .....	55
9. Training program .....	57
9.1. Training at IBA .....	57
9.2. Training on site .....	57
10. Dimensions and Examples of Layouts .....	59
11. References .....	63

5.3.1. Irradiation Station .....	41
5.3.2. Receiving Station .....	41
5.3.3. Pneumatic Transport System (Rabbit System) .....	41
5.3.4. Control Unit .....	41
5.3.5. Penetration Dimensions .....	41
5.4. Solid Target System Specifications .....	43
6. Building Requirements .....	45
6.0.1. Cyclotron Vault .....	45
6.0.2. Target Vault .....	45
6.0.3. Power Supply Room .....	46
6.0.4. Cyclotron Cooling System room .....	46
6.0.5. Cryopump Compressor .....	46
6.1. Utility Specifications .....	46
6.1.1. Electrical Power .....	46
6.1.2. Cooling Water Requirements .....	47
6.1.3. Compressed Air for Valve Action .....	47
6.1.4. Dry Nitrogen for Cyclotron and Ion Source Venting .....	47
6.1.5. Gases for Ion Source: hydrogen, deuterium, helium .....	47
6.2. Building Completion Specifications .....	48
6.2.1. Concrete .....	48
6.2.2. Pipes and Cables .....	48
6.2.3. Utilities .....	48
6.2.4. Chiller Loop Cooling Connections .....	48
6.2.5. Dust .....	48
6.2.6. Lighting and Electrical Equipment Power .....	49
6.2.7. Compressed Air Outlets .....	49
6.2.8. Power Supply and Control Room Flooring .....	49
6.2.9. Ventilation .....	49
6.2.10. Heating .....	49
6.2.11. Radiation Protection .....	49
6.2.12. Infrastructure & Services .....	49
6.2.13. Communication and Surveillance Equipment .....	50
6.2.14. Insertion of the Supplies .....	50
6.2.15. Consulting Services .....	50
7. Spare Parts & Customer Service .....	53
7.1. Importance of the Customer Services .....	53
7.2. Customer Services Organization .....	53
7.3. Maintenance Contract/Service Agreement .....	53
8. Documentation .....	55
8.1. Documentation .....	55
9. Training program .....	57
9.1. Training at IBA .....	57
9.2. Training on site .....	57
10. Dimensions and Examples of Layouts .....	59
11. References .....	63



#### Abstract

The product description provides information for the standard and high current Cyclone® 70.

If you cannot find information in this guide, you can contact us in several ways:

#### Commercial Support

- Phone IBA Molecular: +32 10 47 58 58
- e-mail: info-cyclo@iba-group.com

#### Technical Support

If contractual warrant or service agreement in effect:

- Phone IBA Technical Help desk +32 2 507 20 83 (24hrs/day, 7 days/week)

Otherwise:

- Phone IBA Customer Services +32 10 47 58 31
- Phone the IBA switchboard: +32 10 47 58 11
- Fax: +32 10 47 59 00
- e-mail: customer.support@iba-group.com

#### Notices

We have checked the contents of this product description for conformity with the hardware and/or software described. Since deviations cannot be precluded entirely, we cannot guarantee complete agreement and IBA is not liable for incidental or consequential damages in connection with use of this document.

This document contains proprietary information. No part of this document may be reproduced, translated or transmitted without express written permission from IBA.

#### ISO 9001

IBA is registered and certified in accordance with the ISO 9001 quality system standards.

#### Abstract

The product description provides information for the standard and high current Cyclone® 70.

If you cannot find information in this guide, you can contact us in several ways:

#### Commercial Support

- Phone IBA Molecular: +32 10 47 58 58
- e-mail: info-cyclo@iba-group.com

#### Technical Support

If contractual warrant or service agreement in effect:

- Phone IBA Technical Help desk +32 2 507 20 83 (24hrs/day, 7 days/week)

Otherwise:

- Phone IBA Customer Services +32 10 47 58 31
- Phone the IBA switchboard: +32 10 47 58 11
- Fax: +32 10 47 59 00
- e-mail: customer.support@iba-group.com

#### Notices

We have checked the contents of this product description for conformity with the hardware and/or software described. Since deviations cannot be precluded entirely, we cannot guarantee complete agreement and IBA is not liable for incidental or consequential damages in connection with use of this document.

This document contains proprietary information. No part of this document may be reproduced, translated or transmitted without express written permission from IBA.

#### ISO 9001

IBA is registered and certified in accordance with the ISO 9001 quality system standards.



## IBA activities in a nutshell |

IBA delivers solutions of unprecedented precision in the fields of cancer diagnosis and therapy. The company also offers sterilization and ionization solutions to improve the hygiene and of everyday life.

### Diagnosis |

IBA has unique expertise in the design of cyclotrons and in the production and distribution of radiopharmaceutical tracers which are used every day in hospitals to detect cancer, neurological and cardiac diseases quickly and accurately. IBA also offers dosimetry products used in many hospitals for quality assurance in X-ray diagnosis for patient-dose monitoring.

### Therapy |

IBA has developed radiotherapy solutions and dosimetry equipment to treat cancer with the greatest accuracy. IBA is the undisputed leader in particle therapy, acknowledged to be the most precise and effective clinical radiotherapy method in the selective destruction of cancer cells.

### Sterilization & Ionization |

IBA designs electron accelerators and high power X-Ray solutions used in many industries to sterilize medical devices, to cold pasteurize food products and to improve polymer properties. Over 250 IBA Industrial accelerators are used in the world today, some for more than 40 years.

IBA, a Belgian company, is listed on the pan-European stock exchange Euronext and its Annual Reports can be downloaded on the Web site: <http://www.iba-worldwide.com>.



## IBA activities in a nutshell |

IBA delivers solutions of unprecedented precision in the fields of cancer diagnosis and therapy. The company also offers sterilization and ionization solutions to improve the hygiene and of everyday life.

### Diagnosis |

IBA has unique expertise in the design of cyclotrons and in the production and distribution of radiopharmaceutical tracers which are used every day in hospitals to detect cancer, neurological and cardiac diseases quickly and accurately. IBA also offers dosimetry products used in many hospitals for quality assurance in X-ray diagnosis for patient-dose monitoring.

### Therapy |

IBA has developed radiotherapy solutions and dosimetry equipment to treat cancer with the greatest accuracy. IBA is the undisputed leader in particle therapy, acknowledged to be the most precise and effective clinical radiotherapy method in the selective destruction of cancer cells.

### Sterilization & Ionization |

IBA designs electron accelerators and high power X-Ray solutions used in many industries to sterilize medical devices, to cold pasteurize food products and to improve polymer properties. Over 250 IBA Industrial accelerators are used in the world today, some for more than 40 years.

IBA, a Belgian company, is listed on the pan-European stock exchange Euronext and its Annual Reports can be downloaded on the Web site: <http://www.iba-worldwide.com>.





## 1. Main Features and Benefits

### Acceleration of 70MeV protons and alpha

A fixed field, fixed frequency, variable energy dual proton beam and alpha beam cyclotron based on successful IBA machines Cyclone® 30 and Cyclone® 235.

Proton energy can be independently adjusted for the two extracted beams from 30 to 70 MeV. Alpha beam energy is fixed to 70 MeV.

### Proven design

Since 1986, more than 24 Cyclone® 30 from IBA have been manufactured and are in routine operation around the world, not only at radioisotopes production plants but also in research center. This demonstrates the very high reliability and the validity of the simple and uncritical design which is the base of the Cyclone® 70 design.

### High power versions

Guaranteed proton beam intensities of 350 µA and 500µA are available and upgradable.

### Future flexibility

The Cyclone® 70 offers complete flexibility in terms of particles; acceleration of deuterons (15 to 35 MeV) and HH+ (35 MeV fixed) as well as in the number of exits ports and targets.

### Simultaneous dual target bombardment

Maximum efficiency is achieved through the simultaneous bombardment (with proton or deuteron) of two targets allowing the concurrent production of two different isotopes or the dual production of highly utilized radioisotopes.

### Minimal Exposure

Exposure to personnel and activation of equipment is minimized due to the use of negative ion acceleration technology for the high proton beam while the positive ion deflector use the latest IBA experience with the 235 MeV proton therapy machine.

The IBA cyclotrons are designed to be easy-to-maintain.

### External Beam Lines

The Cyclone® 70 can be equipped with as many as 6 beam lines enabling the beam to be transported into separate target vaults, reducing activity in the cyclotron vault and allowing target manipulation while production is continued in other vaults.

### Minimal running costs

The unique magnet design, derived from the patented IBA deep-valley<sup>1</sup> technology, minimizes power requirements and running costs. A careful RF design reduces the dissipated power and the cooling needs of the cyclotron.

<sup>1</sup>. Patented



## 1. Main Features and Benefits

### Acceleration of 70MeV protons and alpha

A fixed field, fixed frequency, variable energy dual proton beam and alpha beam cyclotron based on successful IBA machines Cyclone® 30 and Cyclone® 235.

Proton energy can be independently adjusted for the two extracted beams from 30 to 70 MeV. Alpha beam energy is fixed to 70 MeV.

### Proven design

Since 1986, more than 24 Cyclone® 30 from IBA have been manufactured and are in routine operation around the world, not only at radioisotopes production plants but also in research center. This demonstrates the very high reliability and the validity of the simple and uncritical design which is the base of the Cyclone® 70 design.

### High power versions

Guaranteed proton beam intensities of 350 µA and 500µA are available and upgradable.

### Future flexibility

The Cyclone® 70 offers complete flexibility in terms of particles; acceleration of deuterons (15 to 35 MeV) and HH+ (35 MeV fixed) as well as in the number of exits ports and targets.

### Simultaneous dual target bombardment

Maximum efficiency is achieved through the simultaneous bombardment (with proton or deuteron) of two targets allowing the concurrent production of two different isotopes or the dual production of highly utilized radioisotopes.

### Minimal Exposure

Exposure to personnel and activation of equipment is minimized due to the use of negative ion acceleration technology for the high proton beam while the positive ion deflector use the latest IBA experience with the 235 MeV proton therapy machine.

The IBA cyclotrons are designed to be easy-to-maintain.

### External Beam Lines

The Cyclone® 70 can be equipped with as many as 6 beam lines enabling the beam to be transported into separate target vaults, reducing activity in the cyclotron vault and allowing target manipulation while production is continued in other vaults.

### Minimal running costs

The unique magnet design, derived from the patented IBA deep-valley<sup>1</sup> technology, minimizes power requirements and running costs. A careful RF design reduces the dissipated power and the cooling needs of the cyclotron.

<sup>1</sup>. Patented

Staff requirements are minimized due to an integrated control system for the cyclotron and the chemistry modules with a user interface operating in a window based environment.

**The Cyclone® 70 system includes a compact turnkey cyclotron, a complete range of targets and automated<sup>1</sup> chemistry modules. The system enables the production of the most complete range of important SPECT and PET isotopes as well as Therapeutic isotopes. It ensures a large supply of all important isotopes and compounds on a routine basis.**

<sup>1</sup>. refer to specific chapter for chemistries availability.

Staff requirements are minimized due to an integrated control system for the cyclotron and the chemistry modules with a user interface operating in a window based environment.

**The Cyclone® 70 system includes a compact turnkey cyclotron, a complete range of targets and automated<sup>1</sup> chemistry modules. The system enables the production of the most complete range of important SPECT and PET isotopes as well as Therapeutic isotopes. It ensures a large supply of all important isotopes and compounds on a routine basis.**

<sup>1</sup>. refer to specific chapter for chemistries availability.

## 2. Technical description

### 2.1. The Cyclotron

#### 2.1.1. General description

The Cyclone® 70 is an isochronous cyclotron, fixed magnetic field and RF frequency, with the aim of simplifying and ensuring maximal operation reliability.

The magnetic structure of Cyclone® 70 is based on the IBA «deep valley» concept. This technology alternates between high magnetic field areas (on the hills of the magnet) and low field zones (in the deep valleys separating the hills).

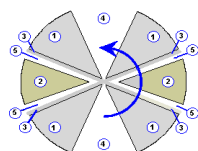


Fig. 1: Schematic horizontal section in the median plan of Cyclone® 70

(1) sectors (2) fees (3) against dees (4) two «valleys» free for pumping, the two others being equipped with dees (5) acceleration gaps.

The blue arrow indicates the rotation direction of the particles.

The Cyclone® 70 is being able to deliver 35-70 MeV proton and 70 MeV alpha beams with two exits ports and dual ion source platform.

The fixed field, fixed frequency cyclotron uses negative ion technology for proton and deuteron acceleration with the benefit of this technology; low activation, high efficiency stripper extraction and dual beam capability.

Proton (and deuteron) beam can be extracted into two exits in dual simultaneous beam of the same particles while alpha beam is extracted into one of the port.

Alpha acceleration (and other  $\frac{1}{2}$  charge/mass ratio particles) makes use of positive ion technology and IBA expertise in electrostatic deflector.

The physical achievement of such a system appeals to IBA's expertise in bi-particle cyclotrons (for example Cyclone® 18/9 and Cyclone® 10/5) and high current proton cyclotrons (Cyclone® 30, Cyclone® 18+) as well as the expertise of IBA in the achievement of the deflector (Cyclone® 235).

## 2. Technical description

### 2.1. The Cyclotron

#### 2.1.1. General description

The Cyclone® 70 is an isochronous cyclotron, fixed magnetic field and RF frequency, with the aim of simplifying and ensuring maximal operation reliability.

The magnetic structure of Cyclone® 70 is based on the IBA «deep valley» concept. This technology alternates between high magnetic field areas (on the hills of the magnet) and low field zones (in the deep valleys separating the hills).

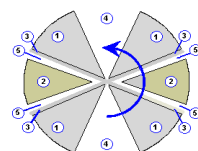


Fig. 1: Schematic horizontal section in the median plan of Cyclone® 70

(1) sectors (2) fees (3) against dees (4) two «valleys» free for pumping, the two others being equipped with dees (5) acceleration gaps.

The blue arrow indicates the rotation direction of the particles.

The Cyclone® 70 is being able to deliver 35-70 MeV proton and 70 MeV alpha beams with two exits ports and dual ion source platform.

The fixed field, fixed frequency cyclotron uses negative ion technology for proton and deuteron acceleration with the benefit of this technology; low activation, high efficiency stripper extraction and dual beam capability.

Proton (and deuteron) beam can be extracted into two exits in dual simultaneous beam of the same particles while alpha beam is extracted into one of the port.

Alpha acceleration (and other  $\frac{1}{2}$  charge/mass ratio particles) makes use of positive ion technology and IBA expertise in electrostatic deflector.

The physical achievement of such a system appeals to IBA's expertise in bi-particle cyclotrons (for example Cyclone® 18/9 and Cyclone® 10/5) and high current proton cyclotrons (Cyclone® 30, Cyclone® 18+) as well as the expertise of IBA in the achievement of the deflector (Cyclone® 235).

### 2.2. Beam characteristic

The Cyclone® 70 concept is a modular, flexible and efficient system for the research and production of radioisotopes based on a industrial cyclotron solution.

see full description in the specification

Extracted Particle	Extracted energy	Extracted intensity	Exit ports	Accelerated ion
Proton	35–70 MeV	350 to 500 $\mu\text{A}^{(*)}$	A and B port	$\text{H}^+$
Deuteron	15–35 MeV	50 $\mu\text{A}$ min.	A and B port	$\text{D}^+$
Alpha	70 MeV	50 $\mu\text{A}$ electrical	A port only	$^4\text{He}^{2+}$
HH+	35 MeV	50 $\mu\text{A}$ electrical	A port only	$\text{HH}^+$
Other particles <sup>a</sup> (charge/mass ratio = $\frac{1}{2}$ )	175 MeV/ nucleon	According to ion source specs (*)	A port only	(charge/mass ratio = $\frac{1}{2}$ )

a. Depending on option chosen

### 2.3. System overview

The Cyclone® 70 cyclotron system includes:

- The cyclotron and all related equipment necessary for the normal production of 35 to 70 MeV proton beams with guaranteed total beam intensity up to 350 and 500  $\mu\text{A}$  extracted and 70 MeV alpha beam of 50  $\mu\text{A}$  (electrical) extracted intensity.
- Dual ion source system, one Multicusp source for protons and deuterons negative ions and one ECR source for alpha and HH+ positive ions generation. Injection line and injection magnet, with vacuum system and diagnostic system. In option, a high power ECR ion source for other particles with  $q/m = \frac{1}{2}$  like fully stripped  $^{12}\text{C}^{6+}$ .
- Capability of dual isotope production over the energy range of 35-70 MeV with the same particle at different energy levels (with limited current flexibility) or at the same energy levels (with maximum current flexibility). Two beams of the same particle (protons or deuterons) can be extracted at the same time at 180° apart.
- The two external switching magnets are able to bend the beams by up to  $\pm 20$  degrees towards one of the three beam ports on each side. In this configuration, six (6) beam lines can be attached to the cyclotron.
- Automatic stripping foil changing capability. Used foils are discarded without opening the cyclotron, due to the strippers airflow system and are automatically replaced by new foils from an external carousel.

### 2.2. Beam characteristic

The Cyclone® 70 concept is a modular, flexible and efficient system for the research and production of radioisotopes based on a industrial cyclotron solution.

see full description in the specification

Extracted Particle	Extracted energy	Extracted intensity	Exit ports	Accelerated ion
Proton	35–70 MeV	350 to 500 $\mu\text{A}^{(*)}$	A and B port	$\text{H}^+$
Deuteron	15–35 MeV	50 $\mu\text{A}$ min.	A and B port	$\text{D}^+$
Alpha	70 MeV	50 $\mu\text{A}$ electrical	A port only	$^4\text{He}^{2+}$
HH+	35 MeV	50 $\mu\text{A}$ electrical	A port only	$\text{HH}^+$
Other particles <sup>a</sup> (charge/mass ratio = $\frac{1}{2}$ )	175 MeV/ nucleon	According to ion source specs (*)	A port only	(charge/mass ratio = $\frac{1}{2}$ )

a. Depending on option chosen

### 2.3. System overview

The Cyclone® 70 cyclotron system includes:

- The cyclotron and all related equipment necessary for the normal production of 35 to 70 MeV proton beams with guaranteed total beam intensity up to 350 and 500  $\mu\text{A}$  extracted and 70 MeV alpha beam of 50  $\mu\text{A}$  (electrical) extracted intensity.
- Dual ion source system, one Multicusp source for protons and deuterons negative ions and one ECR source for alpha and HH+ positive ions generation. Injection line and injection magnet, with vacuum system and diagnostic system. In option, a high power ECR ion source for other particles with  $q/m = \frac{1}{2}$  like fully stripped  $^{12}\text{C}^{6+}$ .
- Capability of dual isotope production over the energy range of 35-70 MeV with the same particle at different energy levels (with limited current flexibility) or at the same energy levels (with maximum current flexibility). Two beams of the same particle (protons or deuterons) can be extracted at the same time at 180° apart.
- The two external switching magnets are able to bend the beams by up to  $\pm 20$  degrees towards one of the three beam ports on each side. In this configuration, six (6) beam lines can be attached to the cyclotron.
- Automatic stripping foil changing capability. Used foils are discarded without opening the cyclotron, due to the strippers airflow system and are automatically replaced by new foils from an external carousel.

- Electrostatic deflector, used for extraction of positive ions (alpha and HH<sup>+</sup>) is delivered with tools for safe removal and maintenance of the assembly from the outside of the cyclotron yoke.
- A complete electrical power distribution cabinet for all IBA equipment, providing a single entry point for the electrical power. All power supplies and electronic devices required for normal operation of the system, including the beam lines.
- Fully automatic computer control system and Siemens SIMATIC PLC., mouse driven "In Touch" software for the PC with fully graphical user interface and printer, for cyclotron operation, new beam developments, unattended scheduled operation & troubleshooting, and the "STEP 7" software for the PLC.
- Primary loop cooling system including the complete demineralized water closed loop system and heat exchanger between primary and secondary cooling systems<sup>1</sup>;
- A complete set of drawings, schematics and manuals in English useful for the operation and maintenance of the cyclotron, including all assembly drawings of IBA equipment.
- Cyclotron vacuum system including four (4) cryopumps of 4000 l/s (N<sub>2</sub>) each and cryo-compressor; ion sources and injection line vacuum (turbo pumps).
- A 100 kW R.F. system based on commercial vacuum tube RF system and IBA design
- The IBA standard LLRF rack (low level RF) for RF system control

**Note:** The beam transport system, the solid target system, the targetry and the automated chemistry modules are described in separate sections and are available separately from the cyclotron.

1. The secondary cooling system (from the heat exchanger to the outside world) is the customer's responsibility.

- Electrostatic deflector, used for extraction of positive ions (alpha and HH<sup>+</sup>) is delivered with tools for safe removal and maintenance of the assembly from the outside of the cyclotron yoke.
- A complete electrical power distribution cabinet for all IBA equipment, providing a single entry point for the electrical power. All power supplies and electronic devices required for normal operation of the system, including the beam lines.
- Fully automatic computer control system and Siemens SIMATIC PLC., mouse driven "In Touch" software for the PC with fully graphical user interface and printer, for cyclotron operation, new beam developments, unattended scheduled operation & troubleshooting, and the "STEP 7" software for the PLC.
- Primary loop cooling system including the complete demineralized water closed loop system and heat exchanger between primary and secondary cooling systems<sup>1</sup>;
- A complete set of drawings, schematics and manuals in English useful for the operation and maintenance of the cyclotron, including all assembly drawings of IBA equipment.
- Cyclotron vacuum system including four (4) cryopumps of 4000 l/s (N<sub>2</sub>) each and cryo-compressor; ion sources and injection line vacuum (turbo pumps).
- A 100 kW R.F. system based on commercial vacuum tube RF system and IBA design
- The IBA standard LLRF rack (low level RF) for RF system control

**Note:** The beam transport system, the solid target system, the targetry and the automated chemistry modules are described in separate sections and are available separately from the cyclotron.

1. The secondary cooling system (from the heat exchanger to the outside world) is the customer's responsibility.

## 2.4. Magnet System

Cyclone® 70 is an isochronous cyclotron, with fixed magnetic field and HF fixed radio-frequency, with the aim of simplifying and assuring the greatest operations reliability.

The magnetic field is produced by a pair of resistive copper coils, located on either side of the accelerator plane. The hollow conductors are cooled by water circulation and a layered structure (in separated coils) is used.

So as to guarantee a high quality magnetic field, the magnetic structure comes from a casting of pure iron with a low carbon content.

The cross-section of the sectors as well as that of the coils of correction wound on each sector allows for a precise adjustment of the magnetic field and the obtaining of a perfect isochronism for the two types of particles. This adjustment is done in the factory magnetic mapping. As a routine, the current in the coils is automatically adjusted according to the accelerated particle.

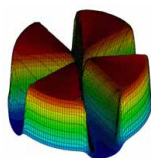


Fig. 2: Magnetic mapping of the deep-valley structure of Cyclone® 70

In the image of all of the cyclotrons designed by IBA, the Cyclone® 70 is a machine of magnetic structure of «deep valley» type, concept patented by IBA, whose great advantages are the following:

### Reduction in internal residual activation

The majority of sub-systems are located in the valleys, far from the acceleration plane and are therefore not exposed to the beam and consequently avoid activation.

### Reduction of power consumed and reduction of internal heating

The small space between the sectors enables a considerable reduction of the power necessary to produce the magnetic field.

On the other hand, as regards the RF system, the cavities and the «dees» (electrodes) are located in the valleys, allowing for the reduction of the total capacitance of the system. Thus lowering the dissipated power in the machine.

### Better focusing of the beam

The gradient of magnetic field between the sectors and the valleys improves the focusing of the beam during its acceleration and therefore reduces the internal losses of the beam.

## 2.4. Magnet System

Cyclone® 70 is an isochronous cyclotron, with fixed magnetic field and HF fixed radio-frequency, with the aim of simplifying and assuring the greatest operations reliability.

The magnetic field is produced by a pair of resistive copper coils, located on either side of the accelerator plane. The hollow conductors are cooled by water circulation and a layered structure (in separated coils) is used.

So as to guarantee a high quality magnetic field, the magnetic structure comes from a casting of pure iron with a low carbon content.

The cross-section of the sectors as well as that of the coils of correction wound on each sector allows for a precise adjustment of the magnetic field and the obtaining of a perfect isochronism for the two types of particles. This adjustment is done in the factory magnetic mapping. As a routine, the current in the coils is automatically adjusted according to the accelerated particle.

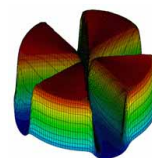


Fig. 2: Magnetic mapping of the deep-valley structure of Cyclone® 70

In the image of all of the cyclotrons designed by IBA, the Cyclone® 70 is a machine of magnetic structure of «deep valley» type, concept patented by IBA, whose great advantages are the following:

### Reduction in internal residual activation

The majority of sub-systems are located in the valleys, far from the acceleration plane and are therefore not exposed to the beam and consequently avoid activation.

### Reduction of power consumed and reduction of internal heating

The small space between the sectors enables a considerable reduction of the power necessary to produce the magnetic field.

On the other hand, as regards the RF system, the cavities and the «dees» (electrodes) are located in the valleys, allowing for the reduction of the total capacitance of the system. Thus lowering the dissipated power in the machine.

### Better focusing of the beam

The gradient of magnetic field between the sectors and the valleys improves the focusing of the beam during its acceleration and therefore reduces the internal losses of the beam.

Better homogeneity of the vacuum in the acceleration plane owing to a direct pumping in the median plane by four pumps located in the valleys.

#### Simplification of the vacuum casing

As the majority of the sub systems are located in the valleys, the drawing of the vacuum chamber has been very much simplified. It is simply made up of two circular parts, completely moulded without soldering, eliminating all potential risks of long term leaks.

#### Greater mechanical rigidity

The RF systems structures are supported by vertical pillars located in the valleys. This type of mounting (compared to a lateral mounting) gives greater mechanical stability, which for example is a very important factor in the case of Dees and the central region.

## 2.5. Adjustment of the main magnetic field:

According to the type of particle, the field is also adjusted locally with the help of compensation coils integrated with the poles.

The spirals of these coils are distributed appropriately on the surface of the poles so as to distribute the field and preserve the isochronism of the different particles only appealing to a single main feed (main adjustable field) and a «correction» field (compensation coils).

Given the slight difference of field necessary to accelerate the alpha or HH+ particles in an isochronous manner, discrimination is easily achieved at the time of the first revolutions for these two particles.

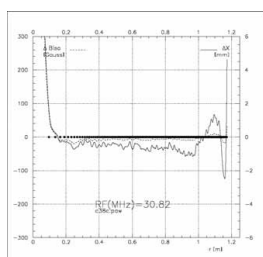


Fig. 3: Magnetic field after compensation for proton/alpha

Better homogeneity of the vacuum in the acceleration plane owing to a direct pumping in the median plane by four pumps located in the valleys.

#### Simplification of the vacuum casing

As the majority of the sub systems are located in the valleys, the drawing of the vacuum chamber has been very much simplified. It is simply made up of two circular parts, completely moulded without soldering, eliminating all potential risks of long term leaks.

#### Greater mechanical rigidity

The RF systems structures are supported by vertical pillars located in the valleys. This type of mounting (compared to a lateral mounting) gives greater mechanical stability, which for example is a very important factor in the case of Dees and the central region.

## 2.5. Adjustment of the main magnetic field:

According to the type of particle, the field is also adjusted locally with the help of compensation coils integrated with the poles.

The spirals of these coils are distributed appropriately on the surface of the poles so as to distribute the field and preserve the isochronism of the different particles only appealing to a single main feed (main adjustable field) and a «correction» field (compensation coils).

Given the slight difference of field necessary to accelerate the alpha or HH+ particles in an isochronous manner, discrimination is easily achieved at the time of the first revolutions for these two particles.

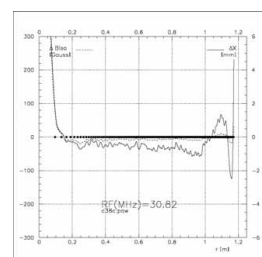


Fig. 3: Magnetic field after compensation for proton/alpha

#### Magnetic Characteristics:

B min: 0.2 Tesla  
B max: 1.5 Tesla  
Correction of field between particle: 300 gauss

Steel weight: 135 Tons  
Copper coils: 7 tons  
Cooling: direct, by water  
Power consumed: 70 kW  
Air (gap): 40 mm

#### User benefits

- Low operation cost (electrical and cooling)
- High reliability
- strong beam focusing (deep-valley)
- up to 6 beam lines, dual beam as a standard

## 2.6. Ion Source

The two sources of ions (one for negative ions and one for the positive ions) are mounted on the outside of the cyclotron vacuum case for easy maintenance access.

Turbo-molecular pumps prevent any backflow of supply gas towards the main vacuum case of the cyclotron and vacuum valves permit the isolation of the different subsets so as not to disrupt the main vacuum at the time of the maintenance of the supplies.

The two sources are mounted side by side and a dipole magnet at 90° guides the ions beam until in the axial injection.

The advantage of this configuration is to permit an effective pumping of the supply gases and to limit their access to the centre of the cyclotron.

The power supplies for the two ions sources are on the outside of the vault of the cyclotron for facilitated access.

### 2.6.1. Arc multicusp ion source for negative ions

The external ion source is a powerful, external multicusp negative ion source to produce H- ions to the cyclotron. With a low diameter aperture, the IBA Ion Source (derived from Culham technology, upgraded by Pantechnik) produce powerful beam of negatively charged hydrogen. The same ion source is used for Cyclone® 30.

#### Magnetic Characteristics:

B min: 0.2 Tesla  
B max: 1.5 Tesla  
Correction of field between particle: 300 gauss

Steel weight: 135 Tons  
Copper coils: 7 tons  
Cooling: direct, by water  
Power consumed: 70 kW  
Air (gap): 40 mm

#### User benefits

- Low operation cost (electrical and cooling)
- High reliability
- strong beam focusing (deep-valley)
- up to 6 beam lines, dual beam as a standard

## 2.6. Ion Source

The two sources of ions (one for negative ions and one for the positive ions) are mounted on the outside of the cyclotron vacuum case for easy maintenance access.

Turbo-molecular pumps prevent any backflow of supply gas towards the main vacuum case of the cyclotron and vacuum valves permit the isolation of the different subsets so as not to disrupt the main vacuum at the time of the maintenance of the supplies.

The two sources are mounted side by side and a dipole magnet at 90° guides the ions beam until in the axial injection.

The advantage of this configuration is to permit an effective pumping of the supply gases and to limit their access to the centre of the cyclotron.

The power supplies for the two ions sources are on the outside of the vault of the cyclotron for facilitated access.

### 2.6.1. Arc multicusp ion source for negative ions

The external ion source is a powerful, external multicusp negative ion source to produce H- ions to the cyclotron. With a low diameter aperture, the IBA Ion Source (derived from Culham technology, upgraded by Pantechnik) produce powerful beam of negatively charged hydrogen. The same ion source is used for Cyclone® 30.

Three filaments create a hydrogen plasma (from the discharge arc) which is contained in a body in aluminium by a specific arrangement of permanent magnets (multicusp).

Each filament is mounted onto a cartridge with quick connectors for a simplified maintenance. The different parts are cooled by water circulation.

Three electrodes are optimized for H<sup>+</sup> extraction: an electrons suppressor, a plasma grid and an acceleration plate which is raised to a high voltage.

The same supply is used to create D<sup>+</sup>, the change of the supply gas and the optimization of the parameters is carried out automatically by the control system of Cyclone® 70.

lifetime of the filament:	> 200 hours
filaments:	3, in cartridges
gas feed rate:	10 cm <sup>3</sup> /min
Acceleration Voltage:	30 – 40 keV
current extracted (H <sup>+</sup> ):	5 mA

## 2.6.2. Multicusp Source (IBA)



Fig. 4: Multicusp source

Three filaments create a hydrogen plasma (from the discharge arc) which is contained in a body in aluminium by a specific arrangement of permanent magnets (multicusp).

Each filament is mounted onto a cartridge with quick connectors for a simplified maintenance. The different parts are cooled by water circulation.

Three electrodes are optimized for H<sup>+</sup> extraction: an electrons suppressor, a plasma grid and an acceleration plate which is raised to a high voltage.

The same supply is used to create D<sup>+</sup>, the change of the supply gas and the optimization of the parameters is carried out automatically by the control system of Cyclone® 70.

lifetime of the filament:	> 200 hours
filaments:	3, in cartridges
gas feed rate:	10 cm <sup>3</sup> /min
Acceleration Voltage:	30 – 40 keV
current extracted (H <sup>+</sup> ):	5 mA

## 2.6.2. Multicusp Source (IBA)



Fig. 4: Multicusp source

## 2.6.3. ECR Source for positive ions

This ECR source (electron cyclotron resonance) is supplied by Pantechnik. It is also an ion source with powerful permanent magnet type and water cooled. The creation of plasma is achieved by a high frequency electric field (14.5 Ghz). A generator is connected by a waveguide in the plasma creation zone.

The vacuum and the gas supply pumping are achieved by a turbomolecular pump close to the source. This ion source has no consumable components.

Acceleration Voltage:	30 keV
Current extract (He <sup>2+</sup> ):	500 µA
UHF Frequency:	14.5 Ghz
UHF Power:	200 W

## 2.6.4. SUPERNANOAN ion source (Pantechnik)



Fig. 5: SUPERNANOAN ion source

### User benefits

- External sources for easy maintenance
- High reliability
- Efficient gas pumping
- Powerful ion source and adapted injection

## 2.6.1. Injection line

On leaving its ion source, the beam of ions is focused and guided along the axial injection line up to the centre of the cyclotron and the focussing shall be assured by quadrupoles.

The alignment of the beam can be corrected by X-Y coils to optimize the beam position in the inflector.

The beam is guided up to the central region of the Cyclone® 70 where it enters into a spiral electrostatic inflector which will guide the beam to the first acceleration gap. This technology is identical to that which equips Cyclone® 30 products by IBA.

## 2.6.3. ECR Source for positive ions

This ECR source (electron cyclotron resonance) is supplied by Pantechnik. It is also an ion source with powerful permanent magnet type and water cooled. The creation of plasma is achieved by a high frequency electric field (14.5 Ghz). A generator is connected by a waveguide in the plasma creation zone.

The vacuum and the gas supply pumping are achieved by a turbomolecular pump close to the source. This ion source has no consumable components.

Acceleration Voltage:	30 keV
Current extract (He <sup>2+</sup> ):	500 µA
UHF Frequency:	14.5 Ghz
UHF Power:	200 W

## 2.6.4. SUPERNANOAN ion source (Pantechnik)



Fig. 5: SUPERNANOAN ion source

### User benefits

- External sources for easy maintenance
- High reliability
- Efficient gas pumping
- Powerful ion source and adapted injection

## 2.6.1. Injection line

On leaving its ion source, the beam of ions is focused and guided along the axial injection line up to the centre of the cyclotron and the focussing shall be assured by quadrupoles.

The alignment of the beam can be corrected by X-Y coils to optimize the beam position in the inflector.

The beam is guided up to the central region of the Cyclone® 70 where it enters into a spiral electrostatic inflector which will guide the beam to the first acceleration gap. This technology is identical to that which equips Cyclone® 30 products by IBA.

The inflector is epitomised by calculation to allow for the most adequate optical beam for the acceleration of particles with respect for the admittance of the cyclotron. The inflector is made up of a complex spiral structure to pass from the radial axis to the median plane of Cyclone® 70.

The voltages present on the inflector go from + 10 and – 10 kV. The two parts of the inflector are supported by insulators, protected from breakdowns or beam losses by two conductive structures in the form of a barrel.

The radial injection is equipped with a Faraday Cup (retractable beam stop) which acts as a beam stop and also diagnostic system to measure ion current injected into the cyclotron.

The axial injection is pumped by a turbo-molecular pump to guarantee a high level of vacuum and to limit beam losses by ion stripping over residual gas.

The injection line also contains a «re-grouper» (or buncher). The re-grouper enables the adaptation of the injected particles in the appropriate RF phase which permits a maximum gain in beam current.



Fig. 6: Spiral injector in the central region of Cyclone® 70

The inflector is epitomised by calculation to allow for the most adequate optical beam for the acceleration of particles with respect for the admittance of the cyclotron. The inflector is made up of a complex spiral structure to pass from the radial axis to the median plane of Cyclone® 70.

The voltages present on the inflector go from + 10 and – 10 kV. The two parts of the inflector are supported by insulators, protected from breakdowns or beam losses by two conductive structures in the form of a barrel.

The radial injection is equipped with a Faraday Cup (retractable beam stop) which acts as a beam stop and also diagnostic system to measure ion current injected into the cyclotron.

The axial injection is pumped by a turbo-molecular pump to guarantee a high level of vacuum and to limit beam losses by ion stripping over residual gas.

The injection line also contains a «re-grouper» (or buncher). The re-grouper enables the adaptation of the injected particles in the appropriate RF phase which permits a maximum gain in beam current.



Fig. 6: Spiral injector in the central region of Cyclone® 70

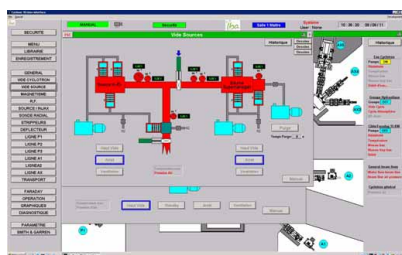


Fig. 7: Source power supplies

With the User-oriented control system, each parameters of the Cyclotron system can be displayed on screen. The status of the power supplies are available, in text format and with colors.

Each Cyclone® 70 sub-system has one or more dedicated screen (above: the source/ injection screen).

#### User benefits

- Simple and reliable design
- Easy to tune
- No critical parts
- Good match between ion source emittance and cyclotron acceptance

#### 2.6.2. R.F. System

The RF chain is derivative of RF systems existent on all IBA cyclotrons with the use of standard components. The RF power is connected to two pairs of flat electrodes in pure copper, placed in two valleys of the cyclotron. These are acceleration electrodes of the beam (the Dees).

The Dees are connected directly via an inductive coupling to the final amplifier on a dees support (stem). The other support is used by the adjustment system which maintains the resonant frequency of the cavity. With the final amplifier located close to the cyclotron (usually in the pit under the Cyclone® 70) the length of high power coaxial lines can be reduced to a minimum, thus reducing losses and interference oscillations henceforth.

IBA uses a RF chain of the type "Master Oscillator Power amplifier"

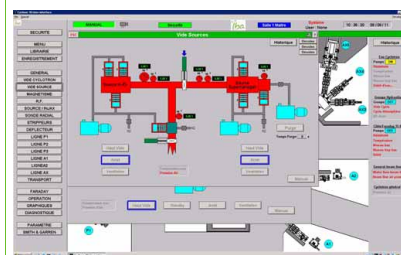


Fig. 7: Source power supplies

With the User-oriented control system, each parameters of the Cyclotron system can be displayed on screen. The status of the power supplies are available, in text format and with colors.

Each Cyclone® 70 sub-system has one or more dedicated screen (above: the source/ injection screen).

#### User benefits

- Simple and reliable design
- Easy to tune
- No critical parts
- Good match between ion source emittance and cyclotron acceptance

#### 2.6.2. R.F. System

The RF chain is derivative of RF systems existent on all IBA cyclotrons with the use of standard components. The RF power is connected to two pairs of flat electrodes in pure copper, placed in two valleys of the cyclotron. These are acceleration electrodes of the beam (the Dees).

The Dees are connected directly via an inductive coupling to the final amplifier on a dees support (stem). The other support is used by the adjustment system which maintains the resonant frequency of the cavity. With the final amplifier located close to the cyclotron (usually in the pit under the Cyclone® 70) the length of high power coaxial lines can be reduced to a minimum, thus reducing losses and interference oscillations henceforth.

IBA uses a RF chain of the type "Master Oscillator Power amplifier"

- Better control of the starting phases ('multipactor' passage)
- Rapid limitation of arcing in the cavity
- Precise control in voltage and frequency
- Optimal adjustment of cavity resonance (tuning)

The chain includes:

- A control and starting up unit (low level rack)
- A vacuum tube pre-amplifier of 5 kW (driver)
- A final vacuum tube amplifier of 100 kW

The RF system does not require conditioning time or complicated start-up procedures.

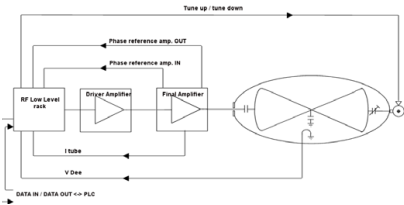


Fig. 8: Cyclone® 70 RF system

2.6.3. Low level rack

The low level rack includes a quartz oscillator paired with a phase locked loop frequency synthesizer for a precise definition of the frequency of the RF system.

The rack is a RF/EMI shielded structure with exchangeable electronic cards. Each card is factory calibrated in a plug-and-play configuration. The rack is supervised with a micro-controller and exchanges informations with the operator console. Voltage, ripple and frequency readback are available on the front face of the rack.

The digital control of the low-level rack allows start up and the precise and automatic adjustment of the Dees voltage as well as the control of the adjusting of the resonance frequency of the Dees to compensate low thermal variations.

It is at the core of the control of the RF chain.

This rack is standard on IBA cyclotrons from 10 MeV to 235 MeV.

- Better control of the starting phases ('multipactor' passage)
- Rapid limitation of arcing in the cavity
- Precise control in voltage and frequency
- Optimal adjustment of cavity resonance (tuning)

The chain includes:

- A control and starting up unit (low level rack)
- A vacuum tube pre-amplifier of 5 kW (driver)
- A final vacuum tube amplifier of 100 kW

The RF system does not require conditioning time or complicated start-up procedures.

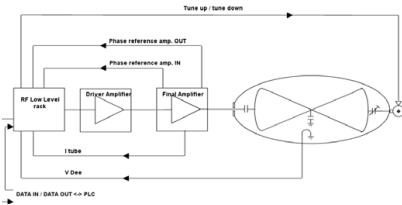


Fig. 8: Cyclone® 70 RF system

2.6.3. Low level rack

The low level rack includes a quartz oscillator paired with a phase locked loop frequency synthesizer for a precise definition of the frequency of the RF system.

The rack is a RF/EMI shielded structure with exchangeable electronic cards. Each card is factory calibrated in a plug-and-play configuration. The rack is supervised with a micro-controller and exchanges informations with the operator console. Voltage, ripple and frequency readback are available on the front face of the rack.

The digital control of the low-level rack allows start up and the precise and automatic adjustment of the Dees voltage as well as the control of the adjusting of the resonance frequency of the Dees to compensate low thermal variations.

It is at the core of the control of the RF chain.

This rack is standard on IBA cyclotrons from 10 MeV to 235 MeV.



Fig. 9: Low level rack

Resolution:	50 Hz
Relative precision:	+/-1.5 E-10
Stability from 0 to 50°C:	+/- 1 E-6
Annual drift:	+/- 2 E-6

An annual calibration is possible by measure of the digital reference and adjustment by a pitch of 50 Hz.

2.6.4. 5 kW amplifier\_

This Tetrode amplifier is a unit used in the majority of IBA cyclotrons, either as a final amplifier or as an intermediary amplifier.

The same amplifier structure with adapted feed allows the delivery of a power of 10 or 15 kW on our Cyclone® 10/5 and 18/9.

In the case of Cyclone® 70, the power supplies are sized for a power of 5 kW with an adapted tube.

The cooling is carried out by air circulation around the RF tube. This tube is located in a resonant cavity structure, completely closed from a RF point of view.

2.6.5. Final Amplifier

The final amplifier uses a Thalès/Thompson tetrode. It is also used in the Cyclone® 230 MeV RF chain. Its output power goes up to 100 kW. This power, used in part for the generation of RF voltage on the Dees, allows the acceleration of protons up to 70 MeV at a current greater than 500 µA, whilst still preserving a power reserve.



Fig. 9: Low level rack

Resolution:	50 Hz
Relative precision:	+/-1.5 E-10
Stability from 0 to 50°C:	+/- 1 E-6
Annual drift:	+/- 2 E-6

An annual calibration is possible by measure of the digital reference and adjustment by a pitch of 50 Hz.

2.6.4. 5 kW amplifier\_

This Tetrode amplifier is a unit used in the majority of IBA cyclotrons, either as a final amplifier or as an intermediary amplifier.


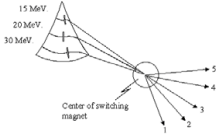
The same amplifier structure with adapted feed allows the delivery of a power of 10 or 15 kW on our Cyclone® 10/5 and 18/9.


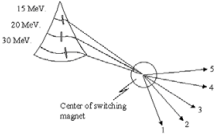
In the case of Cyclone® 70, the power supplies are sized for a power of 5 kW with an adapted tube.


The cooling is carried out by air circulation around the RF tube. This tube is located in a resonant cavity structure, completely closed from a RF point of view.


2.6.5. Final Amplifier

The final amplifier uses a Thalès/Thompson tetrode. It is also used in the Cyclone® 230 MeV RF chain. Its output power goes up to 100 kW. This power, used in part for the generation of RF voltage on the Dees, allows the acceleration of protons up to 70 MeV at a current greater than 500 µA, whilst still preserving a power reserve.

<b>Cyclone® 70</b> <b>Product description</b>											
	<table> <tr> <td>Voltage of Dees:</td><td>50 kV</td></tr> <tr> <td>Control:</td><td>0.1 %</td></tr> <tr> <td>RF Frequency:</td><td>30 MHz</td></tr> <tr> <td>Power in cavity:</td><td>30 kW</td></tr> <tr> <td>RF Anode power supply</td><td>105 kVA</td></tr> </table> <p>The cooling of the RF tube is carried out by water circulation (with special insulating connectors and anti-arcing) while the connectors are cooled by air circulation with the help of a turbine.</p>	Voltage of Dees:	50 kV	Control:	0.1 %	RF Frequency:	30 MHz	Power in cavity:	30 kW	RF Anode power supply	105 kVA
Voltage of Dees:	50 kV										
Control:	0.1 %										
RF Frequency:	30 MHz										
Power in cavity:	30 kW										
RF Anode power supply	105 kVA										
<b>2.6.6. Extraction System</b>											
<b>2.6.6.1. Extraction by strippers (for negative ions)</b>	<p>Cyclone® 70 accelerates negative ions (H<sup>-</sup>) where the peripheral electrons are withdrawn at the time of passage across a fine sheet of carbon (strippers foil).</p> <p>At the time of stripping, the beam of the particle passes from negative (H<sup>-</sup>) to positive (H<sup>+</sup>) and the ions are naturally bent towards the outside by the main magnetic field of the cyclotron and leave via an orifice in the vacuum chamber.</p> <p>The extraction reaches a yield near to 100%</p> <p>This extraction by stripper allows for the natural availability of two beams: by placing a second extraction mechanism at 180°, each stripper only intercepts one part of the beam and permits the irradiation of the two targets from that moment in time.</p> <p>The positioning mechanism of the carbon foil is entirely automatic and controlled by a control system and it allows the extraction of a proton beam in variable energy while driving the strippers more or less in the direction of the centre of the cyclotron.</p> <p>The beam is automatically directed towards the centre of the deflection dipole (the extraction mechanism equalizes trajectory differences) which then directs the beam into the transmission lines.</p>  <p>Fig. 10: Example of extraction by stripper on Cyclone® 70</p>										
C70-TPD-R05 (09-2008)	21   64										

<b>Cyclone® 70</b> <b>Product description</b>											
	<table> <tr> <td>Voltage of Dees:</td><td>50 kV</td></tr> <tr> <td>Control:</td><td>0.1 %</td></tr> <tr> <td>RF Frequency:</td><td>30 MHz</td></tr> <tr> <td>Power in cavity:</td><td>30 kW</td></tr> <tr> <td>RF Anode power supply</td><td>105 kVA</td></tr> </table> <p>The cooling of the RF tube is carried out by water circulation (with special insulating connectors and anti-arcing) while the connectors are cooled by air circulation with the help of a turbine.</p>	Voltage of Dees:	50 kV	Control:	0.1 %	RF Frequency:	30 MHz	Power in cavity:	30 kW	RF Anode power supply	105 kVA
Voltage of Dees:	50 kV										
Control:	0.1 %										
RF Frequency:	30 MHz										
Power in cavity:	30 kW										
RF Anode power supply	105 kVA										
<b>2.6.6. Extraction System</b>											
<b>2.6.6.1. Extraction by strippers (for negative ions)</b>	<p>Cyclone® 70 accelerates negative ions (H<sup>-</sup>) where the peripheral electrons are withdrawn at the time of passage across a fine sheet of carbon (strippers foil).</p> <p>At the time of stripping, the beam of the particle passes from negative (H<sup>-</sup>) to positive (H<sup>+</sup>) and the ions are naturally bent towards the outside by the main magnetic field of the cyclotron and leave via an orifice in the vacuum chamber.</p> <p>The extraction reaches a yield near to 100%</p> <p>This extraction by stripper allows for the natural availability of two beams: by placing a second extraction mechanism at 180°, each stripper only intercepts one part of the beam and permits the irradiation of the two targets from that moment in time.</p> <p>The positioning mechanism of the carbon foil is entirely automatic and controlled by a control system and it allows the extraction of a proton beam in variable energy while driving the strippers more or less in the direction of the centre of the cyclotron.</p> <p>The beam is automatically directed towards the centre of the deflection dipole (the extraction mechanism equalizes trajectory differences) which then directs the beam into the transmission lines.</p>  <p>Fig. 10: Example of extraction by stripper on Cyclone® 70</p>										
C70-TPD-R05 (09-2008)	21   64										

<b>Technical description</b>	
<b>2.6.6.2. Extraction by deflector (for positive ions)</b>	<p>The extraction of positive alpha and HH<sup>+</sup> ions cannot be done by strippers (since there are no longer electrons).</p> <p>Cyclone® 70 then uses the electrostatic deflector technique. This is placed in a deep valley of the main magnet.</p> <p>It is composed of a septum which follows the trajectory calculated for positive ions and high voltage electrode made of polished copper.</p> <p>The gap between the septum and the electrode is fixed but the position of the septum in relation to the beam can be adjusted at a distance.</p> <p>To compensate for the defocusing effect that the beam will undergo by crossing the end of magnetic field of the pole, a magnetostatic gradient corrector is located in the beam outlet. It is made up of two semi-parallel iron plates to make void the radial field to which the beam has been subjected.</p> <p>Field in the deflector: 90 kV/ cm</p> <p>Beside the electrostatic deflectors, IBA has developed solid experience in the design and use of other elements of the extraction system such as magnetostatic gradient correctors and permanent magnet quadrupoles for the focusing of the beam on leaving the vacuum casing.</p>  <p>Fig. 11: Deflector</p>
<b>2.6.7. Diagnostic Probe</b>	<p>A motorised radial probe (beam stop) can be inserted in place of stripper probes. This diagnostic tool permits the comparison of the beam at the centre of the machine (first gap/ pop-up probe) with the beam at different radius from the center.</p> <p>The position of the diagnostic probe is measured by the actuators of the stripper system while the current gathered is recorded in the control system.</p>
<b>2.6.8. Control System</b>	<p>The control system of Cyclone® 70 is based on the standard adopted by IBA for all its accelerators:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ an industrial SIEMENS SIMATIC S7 PLC</li> <li>■ an user interface on a top of the range PC</li> </ul> <p>The languages used are STEP 7 of SIEMENS as well as the software of the InTouch interface from WONDERWARE in Windows NT.</p>
22   64	

<b>Technical description</b>	
<b>2.6.6.2. Extraction by deflector (for positive ions)</b>	<p>The extraction of positive alpha and HH<sup>+</sup> ions cannot be done by strippers (since there are no longer electrons).</p> <p>Cyclone® 70 then uses the electrostatic deflector technique. This is placed in a deep valley of the main magnet.</p> <p>It is composed of a septum which follows the trajectory calculated for positive ions and high voltage electrode made of polished copper.</p> <p>The gap between the septum and the electrode is fixed but the position of the septum in relation to the beam can be adjusted at a distance.</p> <p>To compensate for the defocusing effect that the beam will undergo by crossing the end of magnetic field of the pole, a magnetostatic gradient corrector is located in the beam outlet. It is made up of two semi-parallel iron plates to make void the radial field to which the beam has been subjected.</p> <p>Field in the deflector: 90 kV/ cm</p> <p>Beside the electrostatic deflectors, IBA has developed solid experience in the design and use of other elements of the extraction system such as magnetostatic gradient correctors and permanent magnet quadrupoles for the focusing of the beam on leaving the vacuum casing.</p>  <p>Fig. 11: Deflector</p>
<b>2.6.7. Diagnostic Probe</b>	<p>A motorised radial probe (beam stop) can be inserted in place of stripper probes. This diagnostic tool permits the comparison of the beam at the centre of the machine (first gap/ pop-up probe) with the beam at different radius from the center.</p> <p>The position of the diagnostic probe is measured by the actuators of the stripper system while the current gathered is recorded in the control system.</p>
<b>2.6.8. Control System</b>	<p>The control system of Cyclone® 70 is based on the standard adopted by IBA for all its accelerators:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ an industrial SIEMENS SIMATIC S7 PLC</li> <li>■ an user interface on a top of the range PC</li> </ul> <p>The languages used are STEP 7 of SIEMENS as well as the software of the InTouch interface from WONDERWARE in Windows NT.</p>
22   64	





The "In Touch" IBA-developed control software allows for intuitive, mouse-driven operation, even by personnel with little cyclotron experience. All routine operation is taken care of by the software, including source, R.F. & vacuum. Beam current is measured at the injection line level, at extraction point, at the entrance of the beam transport line and at the exit of the beam transport line. These measures are displayed on the control screen and are used by the control system for real-time adjustment of the beam parameters and as interlocks for the safety of personnel and equipment. The control system also automatically stops the irradiation once the selected amount of beam has been measured on target.

The control system is user-oriented. The major innovation is the user interface, which consists of multi-window application that uses a mouse to move between displays, or to expand displays, and to select commands. This multi-window application is compatible with the Windows environment. The system is menu-driven through self-explanatory, color graphic displays representing essential aspects of the cyclotron. All graphics use color codes to allow easy visualization of the system status. A logbook is also available.

Machine status are communicated to the user by changes of colors on the graphics display (i.e. green to red) and alarm messages. Preset combinations of beams, target operations and beam line tuning are included in the control system.

The "In Touch" application interfaces with the second part of the control system, based on the widely-used and highly reliable SIMATIC Programmable Logic Controller (PLC).

Four encoders (rotary knobs) linked to the PLC by the fast and standard 'Profibus' adjust the machine parameters. The parameters assigned to the two knobs are 'mouse' selected by the Operator (quadrupole current I&2, Ion source arc current/ voltage,...)

The remote access to the control system is possible through a secured access from Internet connection (remote diagnostic and troubleshooting from IBA).

The Cyclotron control program and its peripherals are only achieved by PLC (programmable logic controller):

- Management of the automatic control (Auto Tune) of the beam by action on the main field
- Management of source current to control the beam
- Management of the entire vacuum system/cooling/control of the peripherals
- Supervision of alarms and interlock conditions (safety parameters between the different sub systems)
- Management of beam lines/ management of associated targets



The "In Touch" IBA-developed control software allows for intuitive, mouse-driven operation, even by personnel with little cyclotron experience. All routine operation is taken care of by the software, including source, R.F. & vacuum. Beam current is measured at the injection line level, at extraction point, at the entrance of the beam transport line and at the exit of the beam transport line. These measures are displayed on the control screen and are used by the control system for real-time adjustment of the beam parameters and as interlocks for the safety of personnel and equipment. The control system also automatically stops the irradiation once the selected amount of beam has been measured on target.

The control system is user-oriented. The major innovation is the user interface, which consists of multi-window application that uses a mouse to move between displays, or to expand displays, and to select commands. This multi-window application is compatible with the Windows environment. The system is menu-driven through self-explanatory, color graphic displays representing essential aspects of the cyclotron. All graphics use color codes to allow easy visualization of the system status. A logbook is also available.

Machine status are communicated to the user by changes of colors on the graphics display (i.e. green to red) and alarm messages. Preset combinations of beams, target operations and beam line tuning are included in the control system.

The "In Touch" application interfaces with the second part of the control system, based on the widely-used and highly reliable SIMATIC Programmable Logic Controller (PLC).

Four encoders (rotary knobs) linked to the PLC by the fast and standard 'Profibus' adjust the machine parameters. The parameters assigned to the two knobs are 'mouse' selected by the Operator (quadrupole current I&2, Ion source arc current/ voltage,...)

The remote access to the control system is possible through a secured access from Internet connection (remote diagnostic and troubleshooting from IBA).

The Cyclotron control program and its peripherals are only achieved by PLC (programmable logic controller):

- Management of the automatic control (Auto Tune) of the beam by action on the main field
- Management of source current to control the beam
- Management of the entire vacuum system/cooling/control of the peripherals
- Supervision of alarms and interlock conditions (safety parameters between the different sub systems)
- Management of beam lines/ management of associated targets

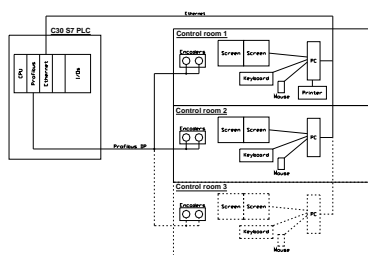


Fig. 12: Diagram showing the interface between the PLC and the control systems.

The user interface includes (hardware):

- A top of the range PC, with two 17" visualization screen
- The network between the high level components is based on Ethernet TCP/ IP
- The rotating encoders by which the operator can vary the parameters of the different sub-systems is based on Profibus DP
- The user interface includes a «mirror» double hard disk to avoid any loss of data, in the event of failure of one of the disks and the CD-Rom burner.
- Secured link via DSL NetScreen Fire wall for maintenance/diagnostic.
- Recording of parameters on hard disk for more than a year.
- Color printer for printing of curves/logbook

On an operational level, the interface allows for:

- The recording of machine parameters and beam line
- The calibration of analogical measures coming from the equipment
- Printing of curves in real time
- Printing of a logbook (machine parameters and beam)
- Management of alarms by sub-systems
- High degree of protection against the loss of beam (audible alarm)

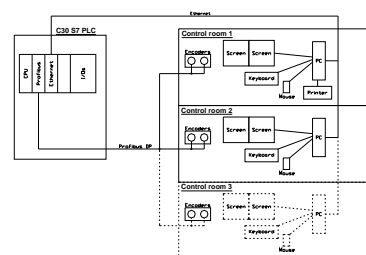


Fig. 12: Diagram showing the interface between the PLC and the control systems.

The user interface includes (hardware):

- A top of the range PC, with two 17" visualization screen
- The network between the high level components is based on Ethernet TCP/ IP
- The rotating encoders by which the operator can vary the parameters of the different sub-systems is based on Profibus DP
- The user interface includes a «mirror» double hard disk to avoid any loss of data, in the event of failure of one of the disks and the CD-Rom burner.
- Secured link via DSL NetScreen Fire wall for maintenance/diagnostic.
- Recording of parameters on hard disk for more than a year.
- Color printer for printing of curves/logbook

On an operational level, the interface allows for:

- The recording of machine parameters and beam line
- The calibration of analogical measures coming from the equipment
- Printing of curves in real time
- Printing of a logbook (machine parameters and beam)
- Management of alarms by sub-systems
- High degree of protection against the loss of beam (audible alarm)

<p><b>Cyclone® 70</b> Product description</p>	<div data-bbox="651 235 737 297"> </div> <div data-bbox="167 327 253 344"> <p><b>2.6.9. Interlocks</b></p> </div> <div data-bbox="331 327 740 394"> <p>The PLC can also accommodate a limited number of signals coming in from customer equipment, such as flags that the customer wishes to see displayed on the control screen, or signals to be used as interlocks or enabling signals. IBA does not however take any responsibility for the result of the use of these inputs by the customer on personnel and equipment safety.</p> </div> <div data-bbox="167 421 284 436"> <p><b>2.6.10. Safety feature</b></p> </div> <div data-bbox="331 421 740 477"> <p>Control system uses beam current thresholds to trigger either audible alarms or ion source current limitation, for the whole safety of the system. The thresholds are user-adjustable (with manager password) and are i.e. collimator maximum current, target maximum current or current range, minimum current ratio target/stripper,...</p> </div> <div data-bbox="331 479 740 519"> <p>In case of power outage, the PLC is configured for 'Fail safe' operation and shutdowns the equipment. When the power is up again, the PLC resumes automatically the cyclotron operation up to beam on ion source faraday cup.</p> </div> <div data-bbox="331 521 740 564"> <p>The user interface PC is configured with a hard-disk mirroring system to avoid down time in case of disk crash. A CD writer enables hard-disk backup and backup of the operation log files (saved parameters and machine values)</p> </div> <div data-bbox="167 591 328 607"> <p><b>2.6.11. Control system options</b></p> </div> <div data-bbox="331 591 740 618"> <p>Different options can be integrated in the Cyclone® 70 control system according to the User needs:</p> </div> <div data-bbox="355 620 740 714"> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ unattended scheduled operation (AUTOSTART) which can start the beam up to the faraday cup.</li> <li>■ Multi-station control system with master/slave, independent workstation or Windows Server with many terminals.</li> <li>■ status/ alarms through SMS (Short Messaging System on GSM network, where available).</li> </ul> </div> <div data-bbox="167 741 277 757"> <p><b>2.6.12. Safety Issues</b></p> </div> <div data-bbox="331 741 740 846"> <p>Many precautions are taken to make the Cyclone® 70 safe to use, to maintain and to trouble-shoot. The majority of these precautions is built in the software that checks all relevant parameters before each action to prevent any hazard or any damage to the cyclotron itself. If a fault is detected, the controller prevents any operator action that could lead to damage and displays the cause of the fault to make troubleshooting more straightforward. Other safety features are mechanical or electrical devices such as arms that ground any dangerous voltage when power supply cabinets are opened.</p> </div> <div data-bbox="331 853 740 976"> <p>Another advantage of negative ion cyclotrons is the very low level of internal activation resulting from low beam losses in the cyclotron, and from the efficient stripping extraction method. This very low activity of the cyclotron reduces radiation exposure for the maintenance personnel and the environment. It is possible to work on the cyclotron soon after beam shut-down. The only active parts might be the targets, but they are designed with low activation level material. For high target current applications, it is recommended to remove the targets from the vicinity of the cyclotron by locating them in separate vaults (with beam line).</p> </div> <div data-bbox="331 983 740 1014"> <p>The vacuum chamber is made of aluminium to further reduce possible activation even if the beam losses are reduced to a minimum in a negative ion cyclotron.</p> </div> <div data-bbox="242 1055 325 1068"> <p>C70-TPD-R05 (09-2008)</p> </div> <div data-bbox="702 1055 740 1068"> <p>25   64</p> </div>
---	--

<p><b>Cyclone® 70</b> Product description</p>	<div data-bbox="1375 235 1461 297"> </div> <div data-bbox="890 327 976 344"> <p><b>2.6.9. Interlocks</b></p> </div> <div data-bbox="1053 327 1461 394"> <p>The PLC can also accommodate a limited number of signals coming in from customer equipment, such as flags that the customer wishes to see displayed on the control screen, or signals to be used as interlocks or enabling signals. IBA does not however take any responsibility for the result of the use of these inputs by the customer on personnel and equipment safety.</p> </div> <div data-bbox="890 421 1007 436"> <p><b>2.6.10. Safety feature</b></p> </div> <div data-bbox="1053 421 1461 477"> <p>Control system uses beam current thresholds to trigger either audible alarms or ion source current limitation, for the whole safety of the system. The thresholds are user-adjustable (with manager password) and are i.e. collimator maximum current, target maximum current or current range, minimum current ratio target/stripper,...</p> </div> <div data-bbox="1053 479 1461 519"> <p>In case of power outage, the PLC is configured for 'Fail safe' operation and shutdowns the equipment. When the power is up again, the PLC resumes automatically the cyclotron operation up to beam on ion source faraday cup.</p> </div> <div data-bbox="1053 521 1461 564"> <p>The user interface PC is configured with a hard-disk mirroring system to avoid down time in case of disk crash. A CD writer enables hard-disk backup and backup of the operation log files (saved parameters and machine values)</p> </div> <div data-bbox="890 591 1051 607"> <p><b>2.6.11. Control system options</b></p> </div> <div data-bbox="1053 591 1461 618"> <p>Different options can be integrated in the Cyclone® 70 control system according to the User needs:</p> </div> <div data-bbox="1077 620 1461 714"> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ unattended scheduled operation (AUTOSTART) which can start the beam up to the faraday cup.</li> <li>■ Multi-station control system with master/slave, independent workstation or Windows Server with many terminals.</li> <li>■ status/ alarms through SMS (Short Messaging System on GSM network, where available).</li> </ul> </div> <div data-bbox="890 741 1000 757"> <p><b>2.6.12. Safety Issues</b></p> </div> <div data-bbox="1053 741 1461 846"> <p>Many precautions are taken to make the Cyclone® 70 safe to use, to maintain and to trouble-shoot. The majority of these precautions is built in the software that checks all relevant parameters before each action to prevent any hazard or any damage to the cyclotron itself. If a fault is detected, the controller prevents any operator action that could lead to damage and displays the cause of the fault to make troubleshooting more straightforward. Other safety features are mechanical or electrical devices such as arms that ground any dangerous voltage when power supply cabinets are opened.</p> </div> <div data-bbox="1053 853 1461 976"> <p>Another advantage of negative ion cyclotrons is the very low level of internal activation resulting from low beam losses in the cyclotron, and from the efficient stripping extraction method. This very low activity of the cyclotron reduces radiation exposure for the maintenance personnel and the environment. It is possible to work on the cyclotron soon after beam shut-down. The only active parts might be the targets, but they are designed with low activation level material. For high target current applications, it is recommended to remove the targets from the vicinity of the cyclotron by locating them in separate vaults (with beam line).</p> </div> <div data-bbox="1053 983 1461 1014"> <p>The vacuum chamber is made of aluminium to further reduce possible activation even if the beam losses are reduced to a minimum in a negative ion cyclotron.</p> </div> <div data-bbox="965 1055 1048 1068"> <p>C70-TPD-R05 (09-2008)</p> </div> <div data-bbox="1426 1055 1465 1068"> <p>25   64</p> </div>
---	--

<p>Technical description</p>	<div data-bbox="387 1283 472 1299"> <p><b>User benefits</b></p> </div> <div data-bbox="416 1301 679 1447"> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ User-oriented control system, intuitive graphic screens</li> <li>■ Safe and easy to operate</li> <li>■ High reliability controller (PLC) Siemens S7</li> <li>■ Color graphic displays: cyclotron, beam lines, targets</li> <li>■ Beam line library &amp; cyclotron parameter crypted files</li> <li>■ Integrated safety features as a standard (interlocks)</li> <li>■ Reduced radiation exposure</li> </ul> </div> <div data-bbox="331 1476 740 1731"> </div> <div data-bbox="167 1982 202 1998"> <p>26   64</p> </div>
------------------------------	--

<p>Technical description</p>	<div data-bbox="1110 1283 1195 1299"> <p><b>User benefits</b></p> </div> <div data-bbox="1139 1301 1402 1447"> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ User-oriented control system, intuitive graphic screens</li> <li>■ Safe and easy to operate</li> <li>■ High reliability controller (PLC) Siemens S7</li> <li>■ Color graphic displays: cyclotron, beam lines, targets</li> <li>■ Beam line library &amp; cyclotron parameter crypted files</li> <li>■ Integrated safety features as a standard (interlocks)</li> <li>■ Reduced radiation exposure</li> </ul> </div> <div data-bbox="1053 1476 1461 1731"> </div> <div data-bbox="890 1982 925 1998"> <p>26   64</p> </div>
------------------------------	--

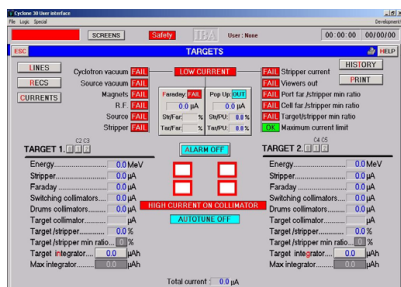


Fig. 13: Overleaf: Cyclone® control and target screens

### 2.6.13. Vacuum System

Pumping capacities have been deliberately over-dimensioned; they are higher than necessary to establish and maintain the required vacuum. This prevents the pumps from running at the limit of their range. In case of loss of vacuum, operation of the R.F. system and the ion sources is automatically prevented, and the vacuum system control automatically restarts a pumping cycle.

Each sub-system is separated with gate valve from the main tank; maintenance of the beam line, the stripper system or the targets can be done without disrupting the main tank vacuum. In addition, the upper magnet can be raised without disrupting the cryopump operation (the pump are isolated by gate valves). This avoids waiting for cryopump warm-up before opening the magnet and conversely when the magnet is closed.

A dry nitrogen system is used for automatic venting of the vacuum systems although venting is seldom necessary.

All steel surfaces inside the cyclotron are nickel plated to reduce out-gassing and to maintain cleanliness of the main tank.

The sources are pumped out by a separate pump to prevent gases from the sources from entering the main vacuum chamber, where acceleration takes place, and from causing beam losses by stripping the H- ions.

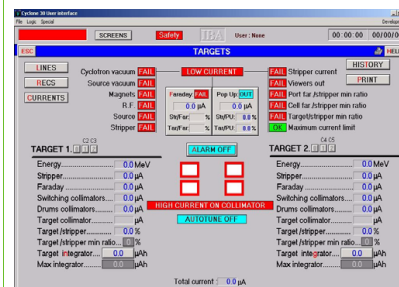


Fig. 13: Overleaf: Cyclone® control and target screens

### 2.6.13. Vacuum System

Pumping capacities have been deliberately over-dimensioned; they are higher than necessary to establish and maintain the required vacuum. This prevents the pumps from running at the limit of their range. In case of loss of vacuum, operation of the R.F. system and the ion sources is automatically prevented, and the vacuum system control automatically restarts a pumping cycle.

Each sub-system is separated with gate valve from the main tank; maintenance of the beam line, the stripper system or the targets can be done without disrupting the main tank vacuum. In addition, the upper magnet can be raised without disrupting the cryopump operation (the pump are isolated by gate valves). This avoids waiting for cryopump warm-up before opening the magnet and conversely when the magnet is closed.

A dry nitrogen system is used for automatic venting of the vacuum systems although venting is seldom necessary.

All steel surfaces inside the cyclotron are nickel plated to reduce out-gassing and to maintain cleanliness of the main tank.

The sources are pumped out by a separate pump to prevent gases from the sources from entering the main vacuum chamber, where acceleration takes place, and from causing beam losses by stripping the H- ions.

The beam transport lines have their own pumping equipment based on oil diffusion pump for maximum system availability, reduced cost and low maintenance.

The pumping sequence and all the vacuum components are automatically controlled from the Control System, preventing misoperation. The vacuum readout of each sub-systems vacuum controllers can be transferred to the Control System for on-line readout.

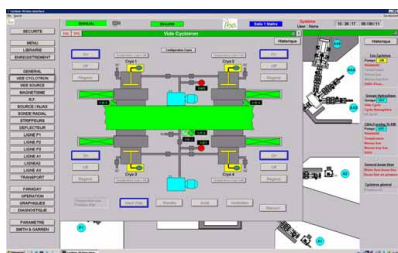


Fig. 14: Vacuum system

#### User benefits

- Large pumping speed
- Gate vacuum valves between each sub-systems
- Maximum availability
- Clean and good vacuum level, reduce losses

### 2.6.14. Lifting system

The upper half of the main magnet yoke and coil is mounted on two hydraulic jacks and can be raised 70 cm. All water-electrical-air connections are arranged in such a manner that they remain connected when opening the cyclotron. In practice, opening the cyclotron is seldom necessary.

The beam transport lines have their own pumping equipment based on oil diffusion pump for maximum system availability, reduced cost and low maintenance.

The pumping sequence and all the vacuum components are automatically controlled from the Control System, preventing misoperation. The vacuum readout of each sub-systems vacuum controllers can be transferred to the Control System for on-line readout.

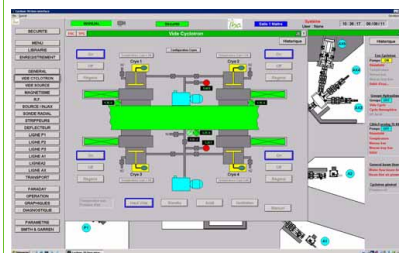



Fig. 14: Vacuum system


#### User benefits

- Large pumping speed
- Gate vacuum valves between each sub-systems
- Maximum availability
- Clean and good vacuum level, reduce losses

### 2.6.14. Lifting system

The upper half of the main magnet yoke and coil is mounted on two hydraulic jacks and can be raised 70 cm. All water-electrical-air connections are arranged in such a manner that they remain connected when opening the cyclotron. In practice, opening the cyclotron is seldom necessary.

<div> Cyclone® 70 Product description </div> <div> <div>2.6.15. Cooling system</div> <div> <p>The cooling system consists of a primary closed loop (included in the cyclotron system) and a secondary loop installed by the customer. The cooling water conditioner, on a single chassis, includes:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Primary water-secondary water heat exchanger</li> <li>■ Deionization column</li> <li>■ Resistivity meter</li> <li>■ Temperature probe for interlock</li> <li>■ Water manifold</li> <li>■ Water pump motor</li> </ul> <p>The secondary water cooling loop removes the heat from the heat exchanger system. The cooling element of the secondary circuit can be an external chiller or a facility cooling system instead of single-pass water. The customer has the responsibility to provide the secondary water with the characteristics of flow and temperature required.</p> <p>Water distribution manifolds, mounted in the cyclotron vault and in the target vaults and connections to the final equipment, are also provided with the system. They do not need manual intervention by the Operator when cyclotron is in operation: the water flow of each system is monitored with flow switches by the control system.</p> <p>The beam line Faraday 15 kW beam stopper and the Solid targets 12 kW systems are water-cooled using two separate water conditioner connected to the cyclotron cooling loop with heat exchangers. The cooling loops are then completely isolated each other.</p> <p>Thanks to the deep-valley patented design, the dissipated power is reduced to a minimum in the Cyclone® 70. The required cooling is under 260 kW (at 370 l/min) for a dual beam operation at 500 µA, 70 MeV including target/ Faraday cooling. The RF final amplifier tube is water cooled for better cooling efficiency and to reduce the HVAC requirement .</p> <p>The saving of electrical power inherent in the «deep valley» concept creates a reduction in the cooling needs of Cyclone® 70.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ The magnetic field is produced with little power</li> <li>■ The Dees are placed in the valleys which reduces the load on the RF and therefore dissipation.</li> </ul> <div>2.6.16. Power Requirements</div> <p>The Cyclone® 70 has been designed to be very efficient thanks to deep-valley superior magnet and thanks to a careful and efficient RF system designed by IBA experts.</p> <p>Further power savings and cost limitation have to be taken into account regarding the reduction of cooling needs (water cooling and HVAC system) for the complete system.</p> <p>Total power consumption, depending on beam intensity, is in the range of 400 kW.</p> </div> <div> C70-TPD-R06 (09-2008) 29   64 </div> </div>	<div>  </div>
--	--

<div> Cyclone® 70 Product description </div> <div> <div>2.6.15. Cooling system</div> <div> <p>The cooling system consists of a primary closed loop (included in the cyclotron system) and a secondary loop installed by the customer. The cooling water conditioner, on a single chassis, includes:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Primary water-secondary water heat exchanger</li> <li>■ Deionization column</li> <li>■ Resistivity meter</li> <li>■ Temperature probe for interlock</li> <li>■ Water manifold</li> <li>■ Water pump motor</li> </ul> <p>The secondary water cooling loop removes the heat from the heat exchanger system. The cooling element of the secondary circuit can be an external chiller or a facility cooling system instead of single-pass water. The customer has the responsibility to provide the secondary water with the characteristics of flow and temperature required.</p> <p>Water distribution manifolds, mounted in the cyclotron vault and in the target vaults and connections to the final equipment, are also provided with the system. They do not need manual intervention by the Operator when cyclotron is in operation: the water flow of each system is monitored with flow switches by the control system.</p> <p>The beam line Faraday 15 kW beam stopper and the Solid targets 12 kW systems are water-cooled using two separate water conditioner connected to the cyclotron cooling loop with heat exchangers. The cooling loops are then completely isolated each other.</p> <p>Thanks to the deep-valley patented design, the dissipated power is reduced to a minimum in the Cyclone® 70. The required cooling is under 260 kW (at 370 l/min) for a dual beam operation at 500 µA, 70 MeV including target/ Faraday cooling. The RF final amplifier tube is water cooled for better cooling efficiency and to reduce the HVAC requirement .</p> <p>The saving of electrical power inherent in the «deep valley» concept creates a reduction in the cooling needs of Cyclone® 70.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ The magnetic field is produced with little power</li> <li>■ The Dees are placed in the valleys which reduces the load on the RF and therefore dissipation.</li> </ul> <div>2.6.16. Power Requirements</div> <p>The Cyclone® 70 has been designed to be very efficient thanks to deep-valley superior magnet and thanks to a careful and efficient RF system designed by IBA experts.</p> <p>Further power savings and cost limitation have to be taken into account regarding the reduction of cooling needs (water cooling and HVAC system) for the complete system.</p> <p>Total power consumption, depending on beam intensity, is in the range of 400 kW.</p> </div> <div> C70-TPD-R06 (09-2008) 29   64 </div> </div>	<div>  </div>
--	--

<div> Technical description </div> <div> <div>2.6.17. Cyclone® 70 performances and maintenance</div> <div> <p>Cyclotron low power consumption and low maintenance cost make the Cyclone® 70 the most economical machine of its kind, its characteristics make it the ideal machine for the production of radioisotopes. The system has been designed to be Operator friendly and to reduce cyclotron staff requirement.</p> <p>Since 1986, more than 24 Cyclone® 30 are in routine operation around the world; this demonstrates the very high reliability and the validity of the simple and uncritical design which is the base of the Cyclone® 70.</p> <p>Each system has its own "Preventive Maintenance Guide" with a paper file and CD-Rom where all maintenance tasks are listed with reference to procedures. These procedures are also indexed with a built-in full-text search index.</p> <p>The preventive maintenance and troubleshooting is further simplified thanks to the modular design of the system with quick-connectors and valves for each sub-system. (refer also to the Customer service and Documentation section)</p> <div> <div>User benefits</div> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Low power consumption</li> <li>■ Lower water cooling requirement</li> <li>■ Lower HVAC requirement</li> <li>■ High efficiency = high reliability</li> </ul> </div> </div> </div> <div> 30   64 </div>	
---	--

<div> Technical description </div> <div> <div>2.6.17. Cyclone® 70 performances and maintenance</div> <div> <p>Cyclotron low power consumption and low maintenance cost make the Cyclone® 70 the most economical machine of its kind, its characteristics make it the ideal machine for the production of radioisotopes. The system has been designed to be Operator friendly and to reduce cyclotron staff requirement.</p> <p>Since 1986, more than 24 Cyclone® 30 are in routine operation around the world; this demonstrates the very high reliability and the validity of the simple and uncritical design which is the base of the Cyclone® 70.</p> <p>Each system has its own "Preventive Maintenance Guide" with a paper file and CD-Rom where all maintenance tasks are listed with reference to procedures. These procedures are also indexed with a built-in full-text search index.</p> <p>The preventive maintenance and troubleshooting is further simplified thanks to the modular design of the system with quick-connectors and valves for each sub-system. (refer also to the Customer service and Documentation section)</p> <div> <div>User benefits</div> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Low power consumption</li> <li>■ Lower water cooling requirement</li> <li>■ Lower HVAC requirement</li> <li>■ High efficiency = high reliability</li> </ul> </div> </div> </div> <div> 30   64 </div>	
---	--

### 3.Cyclone® 70 Cyclotron: Specifications

#### 3.1. Beam Characteristics

##### Negative ions extracted by stripper foils:

Type of ions:	H <sup>+</sup> / D <sup>+</sup>
- accelerated	H <sup>+</sup> / D <sup>+</sup>
- extracted	H <sup>+</sup> / D <sup>+</sup>
Energy (adjustable):	
- proton	35- 70MeV
- deuteron	15- 35 MeV
Guaranteed intensity	350 or 500 µA proton/ 50 µA deuteron
Number of exit ports	up to 6
Number of simultaneous extracted beams	2 (proton or deuteron)
Energy spread:	300 keV- 70 MeV

##### Positive ions extracted by electrostatic deflector:

Type of ions:	accelerated/extracted alpha ( <sup>4</sup> He <sup>2+</sup> )
Energy (fixed):	70 MeV
Guaranteed intensity	50 µA electrical
Number of exit ports:	one
Energy spread:	340 keV- 70 MeV

Type of ions:	
accelerated/extracted	HH <sup>+</sup>
Energy (fixed):	35 MeV (17,5 MeV/nucleon)
Guaranteed intensity	50 µA electrical
Number of exit ports:	one

### 3.Cyclone® 70 Cyclotron: Specifications

#### 3.1. Beam Characteristics

##### Negative ions extracted by stripper foils:

Type of ions:	H <sup>+</sup> / D <sup>+</sup>
- accelerated	H <sup>+</sup> / D <sup>+</sup>
- extracted	H <sup>+</sup> / D <sup>+</sup>
Energy (adjustable):	
- proton	35- 70MeV
- deuteron	15- 35 MeV
Guaranteed intensity	350 or 500 µA proton/ 50 µA deuteron
Number of exit ports	up to 6
Number of simultaneous extracted beams	2 (proton or deuteron)
Energy spread:	300 keV- 70 MeV

##### Positive ions extracted by electrostatic deflector:

Type of ions:	accelerated/extracted alpha ( <sup>4</sup> He <sup>2+</sup> )
Energy (fixed):	70 MeV
Guaranteed intensity	50 µA electrical
Number of exit ports:	one
Energy spread:	340 keV- 70 MeV

Type of ions:	
accelerated/extracted	HH <sup>+</sup>
Energy (fixed):	35 MeV (17,5 MeV/nucleon)
Guaranteed intensity	50 µA electrical
Number of exit ports:	one

#### 3.2. Typical Total Power Consumption

The figures include power taken by water pump and vacuum, they depend on system chosen and on system settings.

##### Power Consumption

- vacuum standby (4 cryopump, 6 beamline) ~ 60 kW
- At 70 MeV, two beam lines (500 µA proton) ~ 350 kW
- At 70 MeV, alpha beam (50 µA) ~200 kW

IBA provides a power distribution panel with all the circuit breakers and cables to power the cyclotron equipment. Ground cables are also included for grounding the cyclotron systems to the power distribution.

#### 3.3. Cyclotron dimensions and weight

- Cyclotron diameter: 4 meters
- Cyclotron height: 3.6 meters (closed)/ 5.2 meters (open)
- weight: 140 tons

#### 3.4. Magnet Structure

Number of sectors:	4
Sector angle (radially varying):	- maximum 58 degrees - minimum 54 degrees
Hill field:	1.7 Tesla
Valley field:	0.12 Tesla
Power in the coils:	50 kW
Iron weight:	130 metric tons
Copper weight:	7 metric tons

#### 3.5. Control System

##### Software:

"In Touch" software, control system, mouse driven, with control console, data transfer capability, adjustable limits for cyclotron parameters;  
PLC software;

##### Hardware:

Programmable Logic Controller (PLC) S7-400 and a high-availability compatible PC with hard-disk mirroring, color printer and modem with fire wall, two control screen.

#### 3.6. R.F. System

Number of dees (connected at the center):	2
Dee angle (effective):	30 degrees
Harmonic mode:	2 (proton) / 4 (alpha)
Frequency (fixed):	30MHz
Dee voltage (nominal):	50 kV
Dissipated R.F. power:	per dee 15 kW
Final amplifier stage:	100 kW <sup>1</sup>

#### 3.2. Typical Total Power Consumption

The figures include power taken by water pump and vacuum, they depend on system chosen and on system settings.

##### Power Consumption

- vacuum standby (4 cryopump, 6 beamline) ~ 60 kW
- At 70 MeV, two beam lines (500 µA proton) ~ 350 kW
- At 70 MeV, alpha beam (50 µA) ~200 kW

IBA provides a power distribution panel with all the circuit breakers and cables to power the cyclotron equipment. Ground cables are also included for grounding the cyclotron systems to the power distribution.

#### 3.3. Cyclotron dimensions and weight

- Cyclotron diameter: 4 meters
- Cyclotron height: 3.6 meters (closed)/ 5.2 meters (open)
- weight: 140 tons

#### 3.4. Magnet Structure

Number of sectors:	4
Sector angle (radially varying):	- maximum 58 degrees - minimum 54 degrees
Hill field:	1.7 Tesla
Valley field:	0.12 Tesla
Power in the coils:	50 kW
Iron weight:	130 metric tons
Copper weight:	7 metric tons

#### 3.5. Control System

##### Software:


"In Touch" software, control system, mouse driven, with control console, data transfer capability, adjustable limits for cyclotron parameters;  
PLC software;


##### Hardware:

Programmable Logic Controller (PLC) S7-400 and a high-availability compatible PC with hard-disk mirroring, color printer and modem with fire wall, two control screen.

#### 3.6. R.F. System

Number of dees (connected at the center):	2
Dee angle (effective):	30 degrees
Harmonic mode:	2 (proton) / 4 (alpha)
Frequency (fixed):	30MHz
Dee voltage (nominal):	50 kV
Dissipated R.F. power:	per dee 15 kW
Final amplifier stage:	100 kW <sup>1</sup>

<div> <div>Cyclone® 70</div> <div>Product description</div> </div> <div>  </div>	
3.7. Ion Source	<div> <div>Type of source proton/deuteron (external)</div> <div>"MULTICUSP"</div> </div> <div> <div>Discharge power</div> <div>1kW</div> </div> <div> <div>Filament replacement</div> <div>3 cartridge unit</div> </div> <div> <div>Filament lifetime</div> <div>&gt; 200 hours</div> </div> <div> <div>H<sub>2</sub> flow rate</div> <div>10 ml/min</div> </div> <div> <div>Source bias voltage</div> <div>30 to 40 kV</div> </div> <div> <div>Type of source alpha (external)</div> <div>"ECR SuperNanogan"</div> </div> <div> <div>RF power</div> <div>200 W</div> </div> <div> <div>RF frequency</div> <div>14.5 Ghz</div> </div> <div> <div>Magnet system</div> <div>permanent magnets</div> </div> <div> <div>Source bias voltage</div> <div>10 to 30 kV</div> </div>
3.8. Main vacuum tank	<div> <div>Roughing pump</div> <div>80 m/h</div> </div> <div> <div>Cryogenic pump</div> <div>4000 l/s (N<sub>2</sub>) each</div> </div> <div> <div></div> <div>6000 l/s (H<sub>2</sub>) each</div> </div> <div> <div>Cryopump compressor</div> <div>90kg, 445*630*470 mm</div> </div>
<div>1.</div>	
<div> <div>C70-TPD-R06 (09-2008)</div> <div>33   64</div> </div>	

<div> <div>Cyclone® 70</div> <div>Product description</div> </div> <div>  </div>	
3.7. Ion Source	<div> <div>Type of source proton/deuteron (external)</div> <div>"MULTICUSP"</div> </div> <div> <div>Discharge power</div> <div>1kW</div> </div> <div> <div>Filament replacement</div> <div>3 cartridge unit</div> </div> <div> <div>Filament lifetime</div> <div>&gt; 200 hours</div> </div> <div> <div>H<sub>2</sub> flow rate</div> <div>10 ml/min</div> </div> <div> <div>Source bias voltage</div> <div>30 to 40 kV</div> </div> <div> <div>Type of source alpha (external)</div> <div>"ECR SuperNanogan"</div> </div> <div> <div>RF power</div> <div>200 W</div> </div> <div> <div>RF frequency</div> <div>14.5 Ghz</div> </div> <div> <div>Magnet system</div> <div>permanent magnets</div> </div> <div> <div>Source bias voltage</div> <div>10 to 30 kV</div> </div>
3.8. Main vacuum tank	<div> <div>Roughing pump</div> <div>80 m/h</div> </div> <div> <div>Cryogenic pump</div> <div>4000 l/s (N<sub>2</sub>) each</div> </div> <div> <div></div> <div>6000 l/s (H<sub>2</sub>) each</div> </div> <div> <div>Cryopump compressor</div> <div>90kg, 445*630*470 mm</div> </div>
<div>1.</div>	
<div> <div>C70-TPD-R06 (09-2008)</div> <div>33   64</div> </div>	

<div>Cyclone® 70 Cyclotron: Specifications</div>	
<div>34   64</div>	

<div>Cyclone® 70 Cyclotron: Specifications</div>	
<div>34   64</div>	

## 4.-Beam Transport System

### 4.1. Standard Layout

The beam transport line is a tube made out of aluminium, isolated from the cyclotron vacuum tank by a valve, designed to safely transport the extracted beam up to the target located in another vault. Aluminium is extensively used to reduce activation.

The main components are tailored to the Customer needs (targetry, beam profile requirements,...). The Cyclone® 70 is designed for simultaneous operation of two proton beam lines, with the total current split in any ratio between the two. One exit is dedicated to alpha beam.

Up to 6 beam lines can be installed on the system.

A standard line layout comprises the following main items:

- Quadrupole doublets: to focus beam towards the target and to change beam profile with maximum flexibility
- One X-Y steering magnet for fine positioning of the beam spot on the target
- One twin drum collimator: water cooled excentric drums to protect the entrance of the line
- A single cube fitted with a 15 kW beam stopper and diagnostic probe, this cube is also the connection for the vacuum system
- Vacuum system: each beam tube has its own pumping station including Oil Diffusion pump with water-cooled baffles backed by a rotary vane pump.
- One double cube fitted with a 2 kW beam viewer and 15 kW beam stopper at the end of the beam line
- Beam line mounted on a bench that assures its stability and alignment
- Power supplies, Pirani and Penning vacuum gauges, vacuum gate valves, vacuum gauge controllers, benches, supports, beam line tubes, flanges, cooling system, vacuum, air and electrical connections for the items listed above
- Option: when equipped with IBA solid target system, one additional pumping station and four-sector collimator is added at the end of the beam line.
- Option: Beam rotation magnet: a three-phase AC magnet is used to rotate the beam and spread the energy on the Solid target without hot spots
- Option: Neutron shutter, a stopper which is inserted in the beam line to automatically cut off the neutron stream from the cyclotron vault to the target vault.
- Option: beam profile monitor with X-Y scanning wires to compute beam profile before target or experimental research system.

## 4.-Beam Transport System

### 4.1. Standard Layout

The beam transport line is a tube made out of aluminium, isolated from the cyclotron vacuum tank by a valve, designed to safely transport the extracted beam up to the target located in another vault. Aluminium is extensively used to reduce activation.

The main components are tailored to the Customer needs (targetry, beam profile requirements,...). The Cyclone® 70 is designed for simultaneous operation of two proton beam lines, with the total current split in any ratio between the two. One exit is dedicated to alpha beam.

Up to 6 beam lines can be installed on the system.

A standard line layout comprises the following main items:

- Quadrupole doublets: to focus beam towards the target and to change beam profile with maximum flexibility
- One X-Y steering magnet for fine positioning of the beam spot on the target
- One twin drum collimator: water cooled excentric drums to protect the entrance of the line
- A single cube fitted with a 15 kW beam stopper and diagnostic probe, this cube is also the connection for the vacuum system
- Vacuum system: each beam tube has its own pumping station including Oil Diffusion pump with water-cooled baffles backed by a rotary vane pump.
- One double cube fitted with a 2 kW beam viewer and 15 kW beam stopper at the end of the beam line
- Beam line mounted on a bench that assures its stability and alignment
- Power supplies, Pirani and Penning vacuum gauges, vacuum gate valves, vacuum gauge controllers, benches, supports, beam line tubes, flanges, cooling system, vacuum, air and electrical connections for the items listed above
- Option: when equipped with IBA solid target system, one additional pumping station and four-sector collimator is added at the end of the beam line.
- Option: Beam rotation magnet: a three-phase AC magnet is used to rotate the beam and spread the energy on the Solid target without hot spots
- Option: Neutron shutter, a stopper which is inserted in the beam line to automatically cut off the neutron stream from the cyclotron vault to the target vault.
- Option: beam profile monitor with X-Y scanning wires to compute beam profile before target or experimental research system.

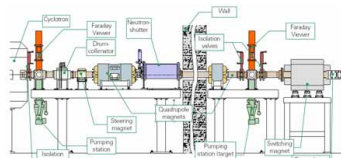


Figure 11: Typical beamline configuration with Solid Target

IBA has expertise in **high power beam line** with a 1.5 mA- 14 MeV transport line for brachytherapy palladium production system with high power beam profile monitor (700µA), high power solid targets, beam shaping and diagnostic devices.

IBA expertise in **long beam transport system** with 235 MeV proton therapy system where beam quality is a premium for patient treatment and where the beam energy is continuously changed with a ESS (energy selection system). Beam path up to 50 meters are quite common

### 4.2. Beam line Control system and library

The Control System for the beam line is included in the cyclotron control system: beam line power supplies status and control, beam parameters and beam diagnostic are available on a graphic interface.

Up to 60 beams type can be automatically recorded for each beam path, all the parameters are saved in the Control System: ion source settings, stripper position, magnet currents, quadrupole currents, steering current and target type.

The parameters are then preset to the power supplies when the operator selects one particular beam. This gives a really straightforward procedure for making beam on a target. The beam lines are fully instrumented, with beam current monitoring, ensuring that tuning an extracted beam onto a particular target is a simple operation.

From a safety point of view, the control system always insert all beam stopper (faraday cup) in the unused beam line, preventing beam accidentally traversing the beamline!

### 4.3. Connection to a target

The target interface at the end of the beam line is a vacuum valve with DN 100 flange where the IBA solid target system or the customer target system is simply bolted.

The collimator (circular or 4-sectors) and target current are fed to the Control System for monitoring and tuning of the beam power on the target.

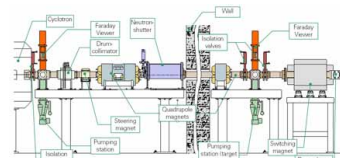


Figure 11: Typical beamline configuration with Solid Target

IBA has expertise in **high power beam line** with a 1.5 mA- 14 MeV transport line for brachytherapy palladium production system with high power beam profile monitor (700µA), high power solid targets, beam shaping and diagnostic devices.

IBA expertise in **long beam transport system** with 235 MeV proton therapy system where beam quality is a premium for patient treatment and where the beam energy is continuously changed with a ESS (energy selection system). Beam path up to 50 meters are quite common

### 4.2. Beam line Control system and library

The Control System for the beam line is included in the cyclotron control system: beam line power supplies status and control, beam parameters and beam diagnostic are available on a graphic interface.

Up to 60 beams type can be automatically recorded for each beam path, all the parameters are saved in the Control System: ion source settings, stripper position, magnet currents, quadrupole currents, steering current and target type.

The parameters are then preset to the power supplies when the operator selects one particular beam. This gives a really straightforward procedure for making beam on a target. The beam lines are fully instrumented, with beam current monitoring, ensuring that tuning an extracted beam onto a particular target is a simple operation.

From a safety point of view, the control system always insert all beam stopper (faraday cup) in the unused beam line, preventing beam accidentally traversing the beamline!

### 4.3. Connection to a target

The target interface at the end of the beam line is a vacuum valve with DN 100 flange where the IBA solid target system or the customer target system is simply bolted.

The collimator (circular or 4-sectors) and target current are fed to the Control System for monitoring and tuning of the beam power on the target.

#### User benefits

- Ease of use thanks to Beam Library
- Integrated control system
- Flexibility of beam optics
- Beam path fully instrumented for current readings
- TRANSPORT programme for beam line design

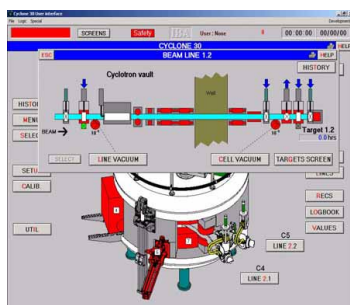


Fig. 15: beam line vacuum control screen

#### User benefits

- Ease of use thanks to Beam Library
- Integrated control system
- Flexibility of beam optics
- Beam path fully instrumented for current readings
- TRANSPORT programme for beam line design

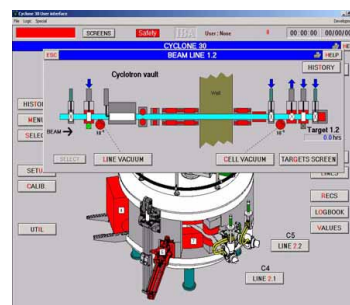


Fig. 15: beam line vacuum control screen





<div> <div>Cyclone® 70</div> <div>Product description</div> </div> <div> <div>5.1. Introduction</div> <div>5.2. Description</div> <div>5.2.1. Sequence of Operations of carrier</div> </div>	<div> <div>iba</div> <div>Molecular</div> </div> <div> <div>5. Solid Target System</div> <p>The IBA Mark II solid target system, an improved version of the former IBA solid target system, aims to reduce the amount of enriched target material and improve the target beam power capacity. Thanks to its original design, it retains the simplicity and reliability that is the hallmark of IBA solutions.</p> <p>In cases where a dual system (comprising two irradiation stations) is ordered, a remotely actuated switching element allows for one of the two rabbit systems to be automatically connected to the receiving station.</p> <p>The hot cell of the receiving station is not included in the supplies. However, upon request, IBA can advise the customer on this matter or propose a specific hot cell.</p> <p>The Mark II system uses a target tilted at 6° with respect to the beam axis, resulting in an enlargement of the axial beam by a factor of 9.5 and a corresponding reduction in material thickness.</p> <p>The focused beam exhibits a gaussian profile of 6 mm FWHM. It is then rotated with a radius of 3 mm at a frequency of 50 Hz, resulting in an apparent flat beam profile after a 10 mm diameter collimator. This flat beam profile, without hot spots, allows for a much higher beam power on target without target material evaporation.</p> <p>The beam rotation is obtained by a cylindrical steering magnet (typically 3000 G cm) fixed around the beam tube with three windings fed by an adjustable 3-phase AC voltage source.</p> <p>The proposed solution with beam rotation allows better uniform irradiation of the target than by simply defocusing the beam onto the target.</p> <p>The target is flat and the target material is electrodeposited on an elliptical shaped area measuring 10 mm x 100 mm. It has a typical thickness of 75- 100 µm which yields a total of 900 milligrams of enriched material. (400 µA model)</p> <p>The water channel section, water flow and pressure have been specifically chosen to ensure a high velocity, high turbulence flow, thereby preventing water from boiling on the back of the target.</p> <p>Target backing material is usually made of copper. However, targets having a gold plated copper backing or even an integral silver backing can be provided.</p> <p>In this system, an aluminum carrier transports the target back and forth between the target station (irradiation station) and the unloading hot cell (receiving station). The carrier moves pneumatically within a square aluminum tubing. Replaceable felt skirts ensure the guiding and sliding in the tube and provide a certain amount of air-tightness.</p> <p>To prevent possible contamination caused by target material dust lost in the rabbit system, the carrier is moved by a partial vacuum rather than by pressure. This partial vacuum is created by a high flow centrifugal blower with its output connected to an absolute filter system. Besides, the beam hole in the carrier is sealed when being transported in the tube.</p> </div> <div> <div>C70-TPD-R05 09-2008</div> <div>39   64</div> </div>
--	--

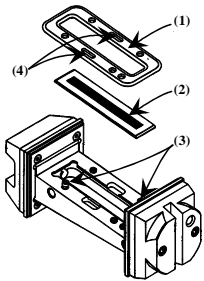
<div> <div>Cyclone® 70</div> <div>Product description</div> </div> <div> <div>5.2.2. Control System</div> </div>	<div> <div>iba</div> <div>Molecular</div> </div> <div> <p>Before activating the centrifugal blower, a number of checks are performed to determine if:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ The carrier is present in the station</li> <li>■ The access door is closed and sealed</li> <li>■ The switching box is locked in position (for multi-irradiation station systems)</li> <li>■ All the equipment in the irradiation station is set in position and ready to receive the carrier</li> </ul> <p>When the carrier is in motion, its position can be monitored by a series of detectors spaced along the pneumatic transfer tube.</p> <p>As it closes into the irradiation station, the carrier passes the point where the vacuum system is connected. Then, as it gets closer to the end of the tube, the air pressure building up in front of it naturally slows it down. A slow suction and a pneumatic cylinder press the carrier into its final position onto the collimator.</p> <p>Cylindrical mating surfaces between the carrier and the collimator ensure proper and accurate positioning of the carrier.</p> <p>The O-ring that acts as an airtight seal between the collimator and the carrier is mounted onto the carrier (and not on the collimator) to facilitate replacement.</p> <p>Once the carrier is in its final position, cylinders press the water-cooling connections on the carrier while the air lock is pumped down on the beam side by a roughing pump.</p> <p>After irradiation, the water-cooling circuit is purged and disconnected. Before activating the centrifugal blower, checks are performed to determine if:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ The switching box is locked in the correct position</li> <li>■ Vacuum seals are airtight</li> <li>■ The reception station is free of carrier</li> </ul> <p>While returning to the receiving station, the carrier is slowed down again by air compression. As it reaches the end of its course, a cylinder presses two fingers into the tube to lock the carrier into position.</p> <p>The carrier can then be removed from the tube for disassembly and the active target can be transferred to a hot cell for processing while a new, un-irradiated target is mounted onto the carrier.</p> <p>All the system logic is integrated and handled by the Cyclone® 70's control system.</p> </div> <div> <div>C70-TPD-R05 09-2008</div> <div>40   64</div> </div>
--	--

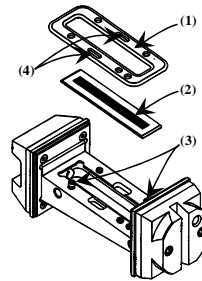
<div> <div>Cyclone® 70</div> <div>Product description</div> </div> <div> <div>5.1. Introduction</div> <div>5.2. Description</div> <div>5.2.1. Sequence of Operations of carrier</div> </div>	<div> <div>iba</div> <div>Molecular</div> </div> <div> <div>5. Solid Target System</div> <p>The IBA Mark II solid target system, an improved version of the former IBA solid target system, aims to reduce the amount of enriched target material and improve the target beam power capacity. Thanks to its original design, it retains the simplicity and reliability that is the hallmark of IBA solutions.</p> <p>In cases where a dual system (comprising two irradiation stations) is ordered, a remotely actuated switching element allows for one of the two rabbit systems to be automatically connected to the receiving station.</p> <p>The hot cell of the receiving station is not included in the supplies. However, upon request, IBA can advise the customer on this matter or propose a specific hot cell.</p> <p>The Mark II system uses a target tilted at 6° with respect to the beam axis, resulting in an enlargement of the axial beam by a factor of 9.5 and a corresponding reduction in material thickness.</p> <p>The focused beam exhibits a gaussian profile of 6 mm FWHM. It is then rotated with a radius of 3 mm at a frequency of 50 Hz, resulting in an apparent flat beam profile after a 10 mm diameter collimator. This flat beam profile, without hot spots, allows for a much higher beam power on target without target material evaporation.</p> <p>The beam rotation is obtained by a cylindrical steering magnet (typically 3000 G cm) fixed around the beam tube with three windings fed by an adjustable 3-phase AC voltage source.</p> <p>The proposed solution with beam rotation allows better uniform irradiation of the target than by simply defocusing the beam onto the target.</p> <p>The target is flat and the target material is electrodeposited on an elliptical shaped area measuring 10 mm x 100 mm. It has a typical thickness of 75- 100 µm which yields a total of 900 milligrams of enriched material. (400 µA model)</p> <p>The water channel section, water flow and pressure have been specifically chosen to ensure a high velocity, high turbulence flow, thereby preventing water from boiling on the back of the target.</p> <p>Target backing material is usually made of copper. However, targets having a gold plated copper backing or even an integral silver backing can be provided.</p> <p>In this system, an aluminum carrier transports the target back and forth between the target station (irradiation station) and the unloading hot cell (receiving station). The carrier moves pneumatically within a square aluminum tubing. Replaceable felt skirts ensure the guiding and sliding in the tube and provide a certain amount of air-tightness.</p> <p>To prevent possible contamination caused by target material dust lost in the rabbit system, the carrier is moved by a partial vacuum rather than by pressure. This partial vacuum is created by a high flow centrifugal blower with its output connected to an absolute filter system. Besides, the beam hole in the carrier is sealed when being transported in the tube.</p> </div> <div> <div>C70-TPD-R05 09-2008</div> <div>39   64</div> </div>
--	--

<div> <div>Cyclone® 70</div> <div>Product description</div> </div> <div> <div>5.2.2. Control System</div> </div>	<div> <div>iba</div> <div>Molecular</div> </div> <div> <p>Before activating the centrifugal blower, a number of checks are performed to determine if:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ The carrier is present in the station</li> <li>■ The access door is closed and sealed</li> <li>■ The switching box is locked in position (for multi-irradiation station systems)</li> <li>■ All the equipment in the irradiation station is set in position and ready to receive the carrier</li> </ul> <p>When the carrier is in motion, its position can be monitored by a series of detectors spaced along the pneumatic transfer tube.</p> <p>As it closes into the irradiation station, the carrier passes the point where the vacuum system is connected. Then, as it gets closer to the end of the tube, the air pressure building up in front of it naturally slows it down. A slow suction and a pneumatic cylinder press the carrier into its final position onto the collimator.</p> <p>Cylindrical mating surfaces between the carrier and the collimator ensure proper and accurate positioning of the carrier.</p> <p>The O-ring that acts as an airtight seal between the collimator and the carrier is mounted onto the carrier (and not on the collimator) to facilitate replacement.</p> <p>Once the carrier is in its final position, cylinders press the water-cooling connections on the carrier while the air lock is pumped down on the beam side by a roughing pump.</p> <p>After irradiation, the water-cooling circuit is purged and disconnected. Before activating the centrifugal blower, checks are performed to determine if:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ The switching box is locked in the correct position</li> <li>■ Vacuum seals are airtight</li> <li>■ The reception station is free of carrier</li> </ul> <p>While returning to the receiving station, the carrier is slowed down again by air compression. As it reaches the end of its course, a cylinder presses two fingers into the tube to lock the carrier into position.</p> <p>The carrier can then be removed from the tube for disassembly and the active target can be transferred to a hot cell for processing while a new, un-irradiated target is mounted onto the carrier.</p> <p>All the system logic is integrated and handled by the Cyclone® 70's control system.</p> </div> <div> <div>C70-TPD-R05 09-2008</div> <div>40   64</div> </div>
--	--

<b>Cyclone® 70</b> <b>Product description</b>	
<b>5.3. Scope of Supply</b>	
<b>5.3.1. Irradiation Station</b>	<p>Includes:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ vacuum Pumping manifold</li> <li>■ High power collimator (4-sectors)</li> <li>■ Target irradiation chamber with carrier positioning and cooling connection mechanism</li> <li>■ Bench allowing careful alignment on the beam line axis</li> <li>■ Vacuum system including roughing pump, roughing and venting valves, Pirani gauge with associated electronics</li> <li>■ Local target cooling unit, including high-flow water pump, heat exchanger, filter and deionizing unit for up to two solid target system</li> <li>■ One target carrier and one spare target carrier</li> <li>■ Five targets made of copper (to be electroplated with actual target material by the customer)</li> <li>■ -3-phase AC steering magnet to rotate the beam on target, with adjustable power supply (variable transformer type) and necessary modifications to the beam line</li> </ul>
<b>5.3.2. Receiving Station</b>	<p>Includes:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Reception end for the rabbit system with shock absorber</li> <li>■ Screw-driver tool for target removal from target carrier.</li> </ul>
<b>5.3.3. Pneumatic Transport System (Rabbit System)</b>	<p>Includes:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ All piping necessary to connect the hot cell to the target stations, up to a total length of 30 m (including up to 10 bends)</li> <li>■ Pressure unit, including partial vacuum, high flow turbine, appropriate valves and connection lines, exhaust filter (absolute filter)</li> </ul>
<b>5.3.4. Control Unit</b>	<p>Includes:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ PLC-based control system, integrated in the cyclotron control system</li> <li>■ L.E.D.-based display and control panel in front of the hot cell, to follow carrier transport in the tube</li> <li>■ All necessary software and operating manuals</li> </ul>
<b>5.3.5. Penetration Dimensions</b>	<p>Two wall penetrations are necessary: one with a 250 mm diameter for the carrier tube and one with a 200 mm diameter for the air lines and other control systems. A minimum bending radius of 500 mm is necessary for the carrier tube.</p>
C70-TPD-R06 (09-2008)	41   64

<b>Cyclone® 70</b> <b>Product description</b>	
<b>5.3. Scope of Supply</b>	
<b>5.3.1. Irradiation Station</b>	<p>Includes:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ vacuum Pumping manifold</li> <li>■ High power collimator (4-sectors)</li> <li>■ Target irradiation chamber with carrier positioning and cooling connection mechanism</li> <li>■ Bench allowing careful alignment on the beam line axis</li> <li>■ Vacuum system including roughing pump, roughing and venting valves, Pirani gauge with associated electronics</li> <li>■ Local target cooling unit, including high-flow water pump, heat exchanger, filter and deionizing unit for up to two solid target system</li> <li>■ One target carrier and one spare target carrier</li> <li>■ Five targets made of copper (to be electroplated with actual target material by the customer)</li> <li>■ -3-phase AC steering magnet to rotate the beam on target, with adjustable power supply (variable transformer type) and necessary modifications to the beam line</li> </ul>
<b>5.3.2. Receiving Station</b>	<p>Includes:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Reception end for the rabbit system with shock absorber</li> <li>■ Screw-driver tool for target removal from target carrier.</li> </ul>
<b>5.3.3. Pneumatic Transport System (Rabbit System)</b>	<p>Includes:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ All piping necessary to connect the hot cell to the target stations, up to a total length of 30 m (including up to 10 bends)</li> <li>■ Pressure unit, including partial vacuum, high flow turbine, appropriate valves and connection lines, exhaust filter (absolute filter)</li> </ul>
<b>5.3.4. Control Unit</b>	<p>Includes:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ PLC-based control system, integrated in the cyclotron control system</li> <li>■ L.E.D.-based display and control panel in front of the hot cell, to follow carrier transport in the tube</li> <li>■ All necessary software and operating manuals</li> </ul>
<b>5.3.5. Penetration Dimensions</b>	<p>Two wall penetrations are necessary: one with a 250 mm diameter for the carrier tube and one with a 200 mm diameter for the air lines and other control systems. A minimum bending radius of 500 mm is necessary for the carrier tube.</p>
C70-TPD-R06 (09-2008)	41   64

<b>Solid Target System</b>	
<b>Radiation Shielding</b>	<p>Due to the high carrier speed, the radiation level during transfer is minimal. Shielding requirements must be adapted to the site and the isotope produced. The transfer system routing in the Building will be done in order to minimize the shielding requirement which is usually done with lead tiles.</p>
	<p>Fig. 16: Target carrier: the shuttle</p> <p>The shuttle comprises the following items: a shuttle body in aluminium, two nylon guides with polyurethane skirts to guide the shuttle in the transport tube, one target (2) and a double target seal (1).</p> <p>To disassemble the shuttle and extract the target, loosen screws (3) by a few turns to remove the seal (1) using the holes intended for pliers handling (4).</p> <p>The shuttle (carrier) and the double seal are reusable.</p>
42   64	

<b>Solid Target System</b>	
<b>Radiation Shielding</b>	<p>Due to the high carrier speed, the radiation level during transfer is minimal. Shielding requirements must be adapted to the site and the isotope produced. The transfer system routing in the Building will be done in order to minimize the shielding requirement which is usually done with lead tiles.</p>
	<p>Fig. 16: Target carrier: the shuttle</p> <p>The shuttle comprises the following items: a shuttle body in aluminium, two nylon guides with polyurethane skirts to guide the shuttle in the transport tube, one target (2) and a double target seal (1).</p> <p>To disassemble the shuttle and extract the target, loosen screws (3) by a few turns to remove the seal (1) using the holes intended for pliers handling (4).</p> <p>The shuttle (carrier) and the double seal are reusable.</p>
42   64	



#### 5.4. Solid Target System Specifications

- Maximum power dissipation of target assembly (on blank copper target): **12 kW**
- Beam profile on target: Gaussian 6 mm FWHM, rotated to uniform flat beam profile after collimator
- Angle of target face to beam: 6 degrees
- Maximum beam intensity for  $^{201}\text{Tl}$  production: 250  $\mu\text{A}$  - 28.5 MeV



Fig. 17: Solid target irradiation station (shuttle and target cavity opened for clarity)

##### User benefits

- Flat beam profile, uniform irradiation
- Reduced amount of enriched material
- Integrated Control System
- Reliability and simplicity
- Pneumatic transport system designed by IBA



#### 5.4. Solid Target System Specifications


- Maximum power dissipation of target assembly (on blank copper target): **12 kW**
- Beam profile on target: Gaussian 6 mm FWHM, rotated to uniform flat beam profile after collimator
- Angle of target face to beam: 6 degrees
- Maximum beam intensity for  $^{201}\text{Tl}$  production: 250  $\mu\text{A}$  - 28.5 MeV




Fig. 17: Solid target irradiation station (shuttle and target cavity opened for clarity)

##### User benefits

- Flat beam profile, uniform irradiation
- Reduced amount of enriched material
- Integrated Control System
- Reliability and simplicity
- Pneumatic transport system designed by IBA

<div> <div>Cyclone® 70</div> <div>Product description</div> </div> <div>  </div>	
<h2>6. Building Requirements</h2>	
<h3>6.1. Recommended Room Configuration</h3>	
<h4>6.1.1. Cyclotron Vault_</h4>	<div> <div>Inside dimensions (min.):</div> <div>8 m x 12m x 5.4 m (h)</div> </div> <div> <div>Door opening:</div> <div>1.5 m (w) x 2 m (h)</div> </div> <div> <div>The cyclotron vault and target vault dimensions depend on system configuration.</div> <div>Recommended vault shielding<sup>1</sup>:</div> <div>Target vaults outer walls: 3.7 m thick</div> <div>Walls between target vaults: 3 m thick</div> <div>Cyclotron vault outer walls: 3 m thick (ordinary concrete, density: 2.35 t/m3)</div> <div>Floor loading: 140 tons on 4 pillars (cyclotrons) 2*10 tons on 4 pillars (bending magnet)</div> <div>Floor drains: As required by local code &amp; subject to health safety rules</div> <div>Pit<sup>2</sup> dimensions: 2.1m deep x 2m wide x 10m minimum length</div> <div>Temperature range: +17 to +25 °C</div> <div>Humidity range: 35% to 65%, non condensing</div> <div>Power dissipated in the air: less than 15 kW</div> </div> <div> <div>The pit must have a convenient entrance and shall be connected by cable ducts to the power supply room, the type and number of which are to be agreed by the customer and IBA.</div> </div>
<h4>6.1.2. Target Vault</h4>	<div> <div>Dimensions:</div> <div>(according use) * 2.5 m (h)</div> </div> <div> <div>Door opening:</div> <div>1.2 m (w) x 2 m (h)</div> </div> <div> <div>The cyclotron vault and target vault dimensions depend on system configuration.</div> <div>Temperature range: +17 to +25 °C</div> <div>Humidity range: 35% to 65%, non condensing</div> <div>Power dissipated in the air: 2 kW</div> </div> <div> <div>1.The entire responsibility for meeting all local and international codes and regulations regarding radiation protection remains with the customer. IBA provides guidelines.</div> <div>2.Pit under the cyclotron.</div> </div>
<div> <div>C70-TPD-R05 (09-2008)</div> <div>45   64</div> </div>	

<div> <div>Cyclone® 70</div> <div>Product description</div> </div> <div>  </div>	
<h2>6. Building Requirements</h2>	
<h3>6.1. Recommended Room Configuration</h3>	
<h4>6.1.1. Cyclotron Vault_</h4>	<div> <div>Inside dimensions (min.):</div> <div>8 m x 12m x 5.4 m (h)</div> </div> <div> <div>Door opening:</div> <div>1.5 m (w) x 2 m (h)</div> </div> <div> <div>The cyclotron vault and target vault dimensions depend on system configuration.</div> <div>Recommended vault shielding<sup>1</sup>:</div> <div>Target vaults outer walls: 3.7 m thick</div> <div>Walls between target vaults: 3 m thick</div> <div>Cyclotron vault outer walls: 3 m thick (ordinary concrete, density: 2.35 t/m3)</div> <div>Floor loading: 140 tons on 4 pillars (cyclotrons) 2*10 tons on 4 pillars (bending magnet)</div> <div>Floor drains: As required by local code &amp; subject to health safety rules</div> <div>Pit<sup>2</sup> dimensions: 2.1m deep x 2m wide x 10m minimum length</div> <div>Temperature range: +17 to +25 °C</div> <div>Humidity range: 35% to 65%, non condensing</div> <div>Power dissipated in the air: less than 15 kW</div> </div> <div> <div>The pit must have a convenient entrance and shall be connected by cable ducts to the power supply room, the type and number of which are to be agreed by the customer and IBA.</div> </div>
<h4>6.1.2. Target Vault</h4>	<div> <div>Dimensions:</div> <div>(according use) * 2.5 m (h)</div> </div> <div> <div>Door opening:</div> <div>1.2 m (w) x 2 m (h)</div> </div> <div> <div>The cyclotron vault and target vault dimensions depend on system configuration.</div> <div>Temperature range: +17 to +25 °C</div> <div>Humidity range: 35% to 65%, non condensing</div> <div>Power dissipated in the air: 2 kW</div> </div> <div> <div>1.The entire responsibility for meeting all local and international codes and regulations regarding radiation protection remains with the customer. IBA provides guidelines.</div> <div>2.Pit under the cyclotron.</div> </div>
<div> <div>C70-TPD-R05 (09-2008)</div> <div>45   64</div> </div>	

<div> <div>Building Requirements</div> </div>	
<h4>6.1.3. Power Supply Room</h4>	<div> <div>Inside dimensions:</div> <div>area: 70 m², free height: 3 m</div> </div> <div> <div>Temperature range:</div> <div>+17 to +25 °C</div> </div> <div> <div>Humidity range:</div> <div>35% to 65%, non condensing</div> </div> <div> <div>Power dissipated in the air:</div> <div>(operation) 23 kW (standby) 5 kW</div> </div> <div> <div>Power supply, control and cyclotron rooms will be located close to each other to avoid long cables and shall not be more than 30 meters away from each other.</div> <div>The power supply room will be equipped with a raised floor (40 cm height) with a 2T/ m load capacity.</div> </div>
<h4>6.1.4. Cyclotron Cooling System room</h4>	<div> <div>The cooling system should be located as close to the cyclotron vault as possible, with access to a water supply.</div> <div>A 6 m area is sufficient to accommodate the heat exchanger, column and pump (1.6 m x 1.4 m minimal dimensions). The area should be easily accessible for servicing the equipment.</div> <div>Locating the cooling system on a different level from the cyclotron's is possible to a maximum height difference of 7 m above the cyclotron median plane (for example; on the vault's roof).</div> </div>
<h4>6.1.5. Cryopump Compressor</h4>	<div> <div>The compressor unit, weighing 90 kg (width: 445 mm, depth: 630 mm, height: 475 mm) can be located on a shelf outside the cyclotron room or in the cyclotron pit. The length of the connections from the compressor to the cryopumps must not exceed 30 meters.</div> </div>
<h2>6.2. Utility Specifications</h2>	
<h4>6.2.1. Electrical Power</h4>	<div> <div>400 V phase to phase +/-5%, 50-60 Hz +/- 2 Hz, three AC phases + neutral + ground.</div> </div> <div> <div>Supply line ratings depend on local regulation, based on power consumption.</div> </div> <div> <div>At 70 MeV, two beam lines (500 µA):</div> <div>Power consumption: 500 kVA</div> <div>Line rating: 600 kVA</div> </div> <div> <div>The power is to be delivered to IBA's power distribution cabinet (330 kVA), final amplifier anode (74 kVA) power supply and main coil power supply in the power supply room.</div> <div>The customer shall provide, install and terminate the AC power input power cables to IBA cabinet in accordance with local electrical code requirements.</div> </div>
<div> <div>46   64</div> </div>	


<div> <div>Building Requirements</div> </div>	
<h4>6.1.3. Power Supply Room</h4>	<div> <div>Inside dimensions:</div> <div>area: 70 m², free height: 3 m</div> </div> <div> <div>Temperature range:</div> <div>+17 to +25 °C</div> </div> <div> <div>Humidity range:</div> <div>35% to 65%, non condensing</div> </div> <div> <div>Power dissipated in the air:</div> <div>(operation) 23 kW (standby) 5 kW</div> </div> <div> <div>Power supply, control and cyclotron rooms will be located close to each other to avoid long cables and shall not be more than 30 meters away from each other.</div> <div>The power supply room will be equipped with a raised floor (40 cm height) with a 2T/ m load capacity.</div> </div>
<h4>6.1.4. Cyclotron Cooling System room</h4>	<div> <div>The cooling system should be located as close to the cyclotron vault as possible, with access to a water supply.</div> <div>A 6 m area is sufficient to accommodate the heat exchanger, column and pump (1.6 m x 1.4 m minimal dimensions). The area should be easily accessible for servicing the equipment.</div> <div>Locating the cooling system on a different level from the cyclotron's is possible to a maximum height difference of 7 m above the cyclotron median plane (for example; on the vault's roof).</div> </div>
<h4>6.1.5. Cryopump Compressor</h4>	<div> <div>The compressor unit, weighing 90 kg (width: 445 mm, depth: 630 mm, height: 475 mm) can be located on a shelf outside the cyclotron room or in the cyclotron pit. The length of the connections from the compressor to the cryopumps must not exceed 30 meters.</div> </div>
<h2>6.2. Utility Specifications</h2>	
<h4>6.2.1. Electrical Power</h4>	<div> <div>400 V phase to phase +/-5%, 50-60 Hz +/- 2 Hz, three AC phases + neutral + ground.</div> </div> <div> <div>Supply line ratings depend on local regulation, based on power consumption.</div> </div> <div> <div>At 70 MeV, two beam lines (500 µA):</div> <div>Power consumption: 500 kVA</div> <div>Line rating: 600 kVA</div> </div> <div> <div>The power is to be delivered to IBA's power distribution cabinet (330 kVA), final amplifier anode (74 kVA) power supply and main coil power supply in the power supply room.</div> <div>The customer shall provide, install and terminate the AC power input power cables to IBA cabinet in accordance with local electrical code requirements.</div> </div>
<div> <div>46   64</div> </div>	


Building Requirements	
6.2.2. Cooling Water Requirements	<p>Normal city water should be available in the cooling room. Drains according to building codes should be included.</p> <p>Pressure: 2- 5 bars Flow: 370l/min Temperature: 7 °C to 20 °C Power to be removed: &lt; 262 kW (dual beam, 500µA 70 MeV) Connection to heat exchanger: DN 50 stainless steel Power will be adapted to Cyclotron option choosen.</p>
6.2.3. Compressed Air for Valve Action	<p>Pressure: 500 kPa to 700 kPa Quality: filtered, dried, oil free Average flow: &lt; 2 l/min Peak flow: &lt; 200 l/min Dew point: &gt; 10°C below ambient</p> <p>A reserve tank of compressed air or compressed nitrogen should be provided (at least 0.5 m³) to allow valves closing in case of power failure. Different connection points will be installed in the building according to IBA recommendations.</p>
6.2.4. Dry Nitrogen for Cyclotron and Ion Source Venting	<p>Pressure: 50 &lt; P &lt; 100 kPa Quantity: 8 m3 (S.T.P.) For cyclotron venting: 0.3 m3 (S.T.P.) For ion source venting: Filtered, dried, and at room temperature</p>
6.2.5. Gases for Ion Source: hydrogen, deuterium, helium	<p>Pressure: 100 &lt; P &lt; 200 kPa Quality: 99,9997%</p> <p>Oxygen (industrial quality) for the electrostatic deflector Pressure: 100 &lt; P &lt; 200 kPa</p> <p>The gases will be connected to the cyclotron manifold using electropolished stainless steel pipe to avoid gas contamination. The pipes must be flushed prior the installation of IBA equipment.</p>
47   64	

Building Requirements	
6.2.2. Cooling Water Requirements	<p>Normal city water should be available in the cooling room. Drains according to building codes should be included.</p> <p>Pressure: 2- 5 bars Flow: 370l/min Temperature: 7 °C to 20 °C Power to be removed: &lt; 262 kW (dual beam, 500µA 70 MeV) Connection to heat exchanger: DN 50 stainless steel Power will be adapted to Cyclotron option choosen.</p>
6.2.3. Compressed Air for Valve Action	<p>Pressure: 500 kPa to 700 kPa Quality: filtered, dried, oil free Average flow: &lt; 2 l/min Peak flow: &lt; 200 l/min Dew point: &gt; 10°C below ambient</p> <p>A reserve tank of compressed air or compressed nitrogen should be provided (at least 0.5 m³) to allow valves closing in case of power failure. Different connection points will be installed in the building according to IBA recommendations.</p>
6.2.4. Dry Nitrogen for Cyclotron and Ion Source Venting	<p>Pressure: 50 &lt; P &lt; 100 kPa Quantity: 8 m3 (S.T.P.) For cyclotron venting: 0.3 m3 (S.T.P.) For ion source venting: Filtered, dried, and at room temperature</p>
6.2.5. Gases for Ion Source: hydrogen, deuterium, helium	<p>Pressure: 100 &lt; P &lt; 200 kPa Quality: 99,9997%</p> <p>Oxygen (industrial quality) for the electrostatic deflector Pressure: 100 &lt; P &lt; 200 kPa</p> <p>The gases will be connected to the cyclotron manifold using electropolished stainless steel pipe to avoid gas contamination. The pipes must be flushed prior the installation of IBA equipment.</p>
47   64	

Building Requirements	
6.3. Building Completion Specifications	<p>The building shall be fully completed and shall have been accepted by IBA prior to the arrival of both the IBA team and the equipment necessary for the installation of the cyclotron. IBA will start installation work when the following conditions meet IBA's reasonable satisfaction and inspection.</p>
6.3.1. Concrete	<p>All concrete must cure for at least four (4) weeks prior to arrival of the cyclotron and related equipment in order to avoid humidity problems, with the exception of the concrete necessary to close the opening in the cyclotron vault wall through which the cyclotron enters the cyclotron vault. The concrete pouring for this closure and the wall surfacing is the customer's responsibility and should be completed no later than three days after the entry of the cyclotron in the cyclotron vault.</p> <p>IBA will provide drawings and guidelines for steel pads to be embedded in the concrete floor to support components load. These steel pads will be fixed with a level difference of +/- 0.5 mm and must be in the same plane.</p>
6.3.2. Pipes and Cables	<p>All conduits, cable trenches, raceways, cable trays and related equipment shall be installed by the customer prior to equipment arrival. Cables and pipes shall be relayed to the various working areas by way of a trench (preferably) or conduits having a diameter of 11 cm (4") built in accordance with relevant electrical standards. All trenches shall be equipped with cable ladders and/or cable ducts and be covered (planks or galvanized roofings...).</p> <p>IBA shall provide detailed drawings and recommendations regarding location, size and number of trenches/pipes and cable trays that are required.</p> <p>Cables and pipes for the building utilities shall be laid in different cable trays or conduits from the cable trays or conduits housing the machine utilities (dedicated IBA trench). Power and signal cables are to be separately routed.</p> <p>If necessary, the trenches will be connected to a sump to avoid collection of accidental leakage fluids at the bottom of the trench.</p> <p>Feed through, designed to prevent radiation leakage, are needed for power cables, control cables, cyclotron system water cooling pipes, vacuum system water cooling pipes, compressed air pipes, gas pipes and target transport system (if applicable).</p> <p>It is the customer's responsibility to ensure that the cable routing system meets local electrical codes and requirements.</p>
6.3.3. Utilities	<p>Building completion implies that all utilities, as described in the "Building Requirements" section, be installed and ready to be put into operation.</p>
6.3.4. Chiller Loop Cooling Connections	<p>All piping from the customer's water cooling system must be installed. Piping, routed to locations suggested by IBA, should have temporary bypass connections installed to "flush" out the system prior to equipment installation. A water make-up line should be provided.</p>
6.3.5. Dust	<p>All floors, ceilings and walls including the inside of the trenches and other openings shall be given a dust repellent surface (e.g. epoxy paint). It is recommended that all surfaces be painted in a light color to improve visibility and to promote safety.</p>
48   64	

Building Requirements	
6.3. Building Completion Specifications	<p>The building shall be fully completed and shall have been accepted by IBA prior to the arrival of both the IBA team and the equipment necessary for the installation of the cyclotron. IBA will start installation work when the following conditions meet IBA's reasonable satisfaction and inspection.</p>
6.3.1. Concrete	<p>All concrete must cure for at least four (4) weeks prior to arrival of the cyclotron and related equipment in order to avoid humidity problems, with the exception of the concrete necessary to close the opening in the cyclotron vault wall through which the cyclotron enters the cyclotron vault. The concrete pouring for this closure and the wall surfacing is the customer's responsibility and should be completed no later than three days after the entry of the cyclotron in the cyclotron vault.</p> <p>IBA will provide drawings and guidelines for steel pads to be embedded in the concrete floor to support components load. These steel pads will be fixed with a level difference of +/- 0.5 mm and must be in the same plane.</p>
6.3.2. Pipes and Cables	<p>All conduits, cable trenches, raceways, cable trays and related equipment shall be installed by the customer prior to equipment arrival. Cables and pipes shall be relayed to the various working areas by way of a trench (preferably) or conduits having a diameter of 11 cm (4") built in accordance with relevant electrical standards. All trenches shall be equipped with cable ladders and/or cable ducts and be covered (planks or galvanized roofings...).</p> <p>IBA shall provide detailed drawings and recommendations regarding location, size and number of trenches/pipes and cable trays that are required.</p> <p>Cables and pipes for the building utilities shall be laid in different cable trays or conduits from the cable trays or conduits housing the machine utilities (dedicated IBA trench). Power and signal cables are to be separately routed.</p> <p>If necessary, the trenches will be connected to a sump to avoid collection of accidental leakage fluids at the bottom of the trench.</p> <p>Feed through, designed to prevent radiation leakage, are needed for power cables, control cables, cyclotron system water cooling pipes, vacuum system water cooling pipes, compressed air pipes, gas pipes and target transport system (if applicable).</p> <p>It is the customer's responsibility to ensure that the cable routing system meets local electrical codes and requirements.</p>
6.3.3. Utilities	<p>Building completion implies that all utilities, as described in the "Building Requirements" section, be installed and ready to be put into operation.</p>
6.3.4. Chiller Loop Cooling Connections	<p>All piping from the customer's water cooling system must be installed. Piping, routed to locations suggested by IBA, should have temporary bypass connections installed to "flush" out the system prior to equipment installation. A water make-up line should be provided.</p>
6.3.5. Dust	<p>All floors, ceilings and walls including the inside of the trenches and other openings shall be given a dust repellent surface (e.g. epoxy paint). It is recommended that all surfaces be painted in a light color to improve visibility and to promote safety.</p>
48   64	

<div> <div>Cyclone® 70</div> <div>Product description</div> </div> <div>  </div>	
<div>6.3.6. Lighting and Electrical Equipment Power</div>	<p>Suitable and sufficient lighting shall be provided in all work areas. Standard recommendations are as follows:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Vault and target cells 250 Lux at the median plane (1.25 m above floor)</li> <li>Power supply room 200 Lux</li> <li>Control room 300 Lux</li> </ul> <p>Emergency lighting should be available in all relevant areas. Single phase outlets shall be located in each room where IBA equipment will be installed.</p>
<div>6.3.7. Compressed Air Outlets</div>	<p>Exact location for the compressed air outlets will be specified by IBA to the customer in due time.</p>
<div>6.3.8. Power Supply and Control Room Flooring</div>	<p>This room requires a raised or "computer" type flooring (to be installed by the customer).</p>
<div>6.3.9. Ventilation</div>	<p>The control and power supply rooms will be air-conditioned to ensure optimal operation of the electronic equipment. The other areas will be ventilated and heated when necessary. Ventilation conditions and other conditions, shall be organized according to the current regulations in the customer's country. The relative humidity level will not exceed 65% in all relevant areas and shall not give rise to any condensation. The passageways of ventilation ducts in the walls shall comply with the safety precautions concerning radiations.</p>
<div>6.3.10. Heating</div>	<p>A temperature of 15 to 28 °C will be maintained in all relevant areas during the installation and testing of the equipment.</p>
<div>6.3.11. Radiation Protection</div>	<p>While IBA can offer building design suggestions, the entire responsibility for meeting all local codes and regulations regarding radiation protection remains with the customer. The building and all work areas will comply with all relevant safety standards concerning radiation protection during all phases of construction, installation, testing and operation. The customer will be responsible for obtaining, from a specialist, installation plans of a radiation protection system in accordance with local codes and regulations.</p> <p>IBA expertise can also include a Monte Carlo simulation of the bunker.</p>
<div>6.3.12. Infrastructure &amp; Services</div>	<p>IBA requires sufficient office space, tool storage, lockers and shower facilities for its personnel during the period of installation and testing. Construction site access must also meet the approval of the IBA engineer. The customer must, at his own expenses, arrange for the destruction, pick-up and/or clearing away of all waste, including IBA's Supplies packaging. Besides the maintenance of the building site, providing security and fire protection is also under the customer's responsibility.</p>
<div> <div>C70-TPD-R06 (09-2008)</div> <div>49   64</div> </div>	

<div> <div>Cyclone® 70</div> <div>Product description</div> </div> <div>  </div>	
<div>6.3.6. Lighting and Electrical Equipment Power</div>	<p>Suitable and sufficient lighting shall be provided in all work areas. Standard recommendations are as follows:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Vault and target cells 250 Lux at the median plane (1.25 m above floor)</li> <li>Power supply room 200 Lux</li> <li>Control room 300 Lux</li> </ul> <p>Emergency lighting should be available in all relevant areas. Single phase outlets shall be located in each room where IBA equipment will be installed.</p>
<div>6.3.7. Compressed Air Outlets</div>	<p>Exact location for the compressed air outlets will be specified by IBA to the customer in due time.</p>
<div>6.3.8. Power Supply and Control Room Flooring</div>	<p>This room requires a raised or "computer" type flooring (to be installed by the customer).</p>
<div>6.3.9. Ventilation</div>	<p>The control and power supply rooms will be air-conditioned to ensure optimal operation of the electronic equipment. The other areas will be ventilated and heated when necessary. Ventilation conditions and other conditions, shall be organized according to the current regulations in the customer's country. The relative humidity level will not exceed 65% in all relevant areas and shall not give rise to any condensation. The passageways of ventilation ducts in the walls shall comply with the safety precautions concerning radiations.</p>
<div>6.3.10. Heating</div>	<p>A temperature of 15 to 28 °C will be maintained in all relevant areas during the installation and testing of the equipment.</p>
<div>6.3.11. Radiation Protection</div>	<p>While IBA can offer building design suggestions, the entire responsibility for meeting all local codes and regulations regarding radiation protection remains with the customer. The building and all work areas will comply with all relevant safety standards concerning radiation protection during all phases of construction, installation, testing and operation. The customer will be responsible for obtaining, from a specialist, installation plans of a radiation protection system in accordance with local codes and regulations.</p> <p>IBA expertise can also include a Monte Carlo simulation of the bunker.</p>
<div>6.3.12. Infrastructure &amp; Services</div>	<p>IBA requires sufficient office space, tool storage, lockers and shower facilities for its personnel during the period of installation and testing. Construction site access must also meet the approval of the IBA engineer. The customer must, at his own expenses, arrange for the destruction, pick-up and/or clearing away of all waste, including IBA's Supplies packaging. Besides the maintenance of the building site, providing security and fire protection is also under the customer's responsibility.</p>
<div> <div>C70-TPD-R06 (09-2008)</div> <div>49   64</div> </div>	

<div> <div>Building Requirements</div> </div>	
<div>6.3.13. Communication and Surveillance Equipment</div>	<p>An intercom system shall interlink the cyclotron vault, the target cells, the power supply room, the water supply room and the control room. It would be useful to be able to communicate from the control room to all related areas. It is suggested that a television system be used in the cyclotron vault and in the cyclotron control room for personnel safety. Buyer will have at no charge an on-site phone and internet access for cyclotron supplier use.</p>
<div>6.3.14. Insertion of the Supplies</div>	<ul style="list-style-type: none"> <li>An opening shall be made in the cyclotron vault to allow for the insertion of the cyclotron. This can be a 4.5 m wide by 3.2 m high opening in a wall of the cyclotron vault. This opening shall be closed and surfaced by the customer as soon as the cyclotron is rigged into the cyclotron vault, as closing this opening is necessary for the installation of the Supplies. The opening will be completely closed and surfaced no later than three days after the entry of the cyclotron in the cyclotron vault.</li> <li>A maneuvering area for unloading from a heavy trailer (120 tons load) with the use of a 200T crane and a covered area (300 m) for the assembly of the major components of the Supplies must be provided in front of the opening outside the vault with adequate access to nearby roads.</li> <li>The covered area should be able to serve as a storage area for the rest of the Supplies while the cyclotron is rigged and the opening in the vault is closed. Its floor shall support the use of a five-ton forklift truck.</li> <li>The ground of the cyclotron vault and the unloading area shall be surfaced with reinforced concrete capable of withstanding the necessary maneuvering of the cyclotron into position. (150 tons load)</li> <li>All doors, corridors,... leading to the control room, target rooms or any other room where IBA equipment will be installed shall be cleared to allow transportation of IBA equipment by mean of a five-ton forklift truck or a similar transportation vehicle from the unloading area to the place of final installation of the said equipment minimum opening 1.5 (w) x 2.5 m (h)</li> <li>For unloading and installation of additional equipment delivered to the site during the installation period, the customer shall prepare building access and surroundings in order to allow access and unloading of 20-ton trucks (unloading platform if possible). It must be possible to perform the unloading of the trucks and the introduction of the additional equipment in the building with a hand-lift. The availability of the customer's fork-lift would be appreciated.</li> </ul>
<div>6.3.15. Consulting Services</div>	<p>Typically, prior to the issuance of a purchase order or execution of some other form of purchase agreement, IBA will have prepared a preliminary layout of the customer's facility and furnished various data regarding required building services. After the purchase agreement has become effective, IBA, without additional charge, will make a final layout and prepare such other plans and memoranda necessary to transmit data to the customer's architects and engineers.</p> <p>Similarly, IBA, without additional charge, will review the initial set of architectural and engineering drawings and minor revisions thereof. However, the time devoted by IBA personnel to preparation of additional layouts or drawings and/or reviews of revised sets of architectural and engineering drawings will be invoiced at IBA's regular rates. No additional charge will be made for telephone consultations.</p>
<div> <div>50   64</div> </div>	

<div> <div>Building Requirements</div> </div>	
<div>6.3.13. Communication and Surveillance Equipment</div>	<p>An intercom system shall interlink the cyclotron vault, the target cells, the power supply room, the water supply room and the control room. It would be useful to be able to communicate from the control room to all related areas. It is suggested that a television system be used in the cyclotron vault and in the cyclotron control room for personnel safety. Buyer will have at no charge an on-site phone and internet access for cyclotron supplier use.</p>
<div>6.3.14. Insertion of the Supplies</div>	<ul style="list-style-type: none"> <li>An opening shall be made in the cyclotron vault to allow for the insertion of the cyclotron. This can be a 4.5 m wide by 3.2 m high opening in a wall of the cyclotron vault. This opening shall be closed and surfaced by the customer as soon as the cyclotron is rigged into the cyclotron vault, as closing this opening is necessary for the installation of the Supplies. The opening will be completely closed and surfaced no later than three days after the entry of the cyclotron in the cyclotron vault.</li> <li>A maneuvering area for unloading from a heavy trailer (120 tons load) with the use of a 200T crane and a covered area (300 m) for the assembly of the major components of the Supplies must be provided in front of the opening outside the vault with adequate access to nearby roads.</li> <li>The covered area should be able to serve as a storage area for the rest of the Supplies while the cyclotron is rigged and the opening in the vault is closed. Its floor shall support the use of a five-ton forklift truck.</li> <li>The ground of the cyclotron vault and the unloading area shall be surfaced with reinforced concrete capable of withstanding the necessary maneuvering of the cyclotron into position. (150 tons load)</li> <li>All doors, corridors,... leading to the control room, target rooms or any other room where IBA equipment will be installed shall be cleared to allow transportation of IBA equipment by mean of a five-ton forklift truck or a similar transportation vehicle from the unloading area to the place of final installation of the said equipment minimum opening 1.5 (w) x 2.5 m (h)</li> <li>For unloading and installation of additional equipment delivered to the site during the installation period, the customer shall prepare building access and surroundings in order to allow access and unloading of 20-ton trucks (unloading platform if possible). It must be possible to perform the unloading of the trucks and the introduction of the additional equipment in the building with a hand-lift. The availability of the customer's fork-lift would be appreciated.</li> </ul>
<div>6.3.15. Consulting Services</div>	<p>Typically, prior to the issuance of a purchase order or execution of some other form of purchase agreement, IBA will have prepared a preliminary layout of the customer's facility and furnished various data regarding required building services. After the purchase agreement has become effective, IBA, without additional charge, will make a final layout and prepare such other plans and memoranda necessary to transmit data to the customer's architects and engineers.</p> <p>Similarly, IBA, without additional charge, will review the initial set of architectural and engineering drawings and minor revisions thereof. However, the time devoted by IBA personnel to preparation of additional layouts or drawings and/or reviews of revised sets of architectural and engineering drawings will be invoiced at IBA's regular rates. No additional charge will be made for telephone consultations.</p>
<div> <div>50   64</div> </div>	




Any travel-related expenses that arise as a result of required meeting outside Belgium with the buyer's architects, engineers, consultants and/or representatives will be reimbursed by the customer. With respect to the foregoing, the responsibility for determining whether conflict exists between local building codes and/or other laws or government regulations and the content of drawings, data sheets, memoranda or other forms of communication submitted by IBA is solely the responsibility of the customer, his architects, engineers and/or consultants.




Any travel-related expenses that arise as a result of required meeting outside Belgium with the buyer's architects, engineers, consultants and/or representatives will be reimbursed by the customer. With respect to the foregoing, the responsibility for determining whether conflict exists between local building codes and/or other laws or government regulations and the content of drawings, data sheets, memoranda or other forms of communication submitted by IBA is solely the responsibility of the customer, his architects, engineers and/or consultants.



<div> Cyclone® 70 Product description </div> <div> 7.1. Importance of the Customer Services </div> <div> 7.2. Customer Services Organization </div> <div> 7.3. Maintenance Contract/Service Agreement </div>	<div>  </div> <div> <h2>7. Spare Parts &amp; Customer Service</h2> </div> <div> <p>IBA emphasize the importance of an efficient and reliable Customer Services for its customers, from the commercial producers of radioisotopes to, and especially, the users of equipment.</p> <p>Each SPECT/ PET isotope production systems offered and installed by IBA comes with tailored Customer Services service programs, adapted to the resources and needs of the user, and to the demanding requirements attached to the operation and maintenance of a piece of equipment installed in a medical environment.</p> <p>At IBA Customer Services, we listen to customer needs to deliver innovative customized solutions all over the world.</p> <p>Most IBA equipment, especially the numerous Cyclone® 30's used by industrial producers of radio-isotopes, operates 24 hours-a-day, and need rapid intervention from IBA when a functioning problem arises. In this spirit, IBA has developed an organization that ensures the permanent availability of a team of engineers ready to leave within the few hours following a customer's call. For regular breakdown interventions, IBA also resorts to competent local engineers, trained by IBA, whose delay of intervention is still decreased.</p> <p>On the operational point of view, the Customer Services has its own field engineers specialized in Radio Frequency,</p> <p>Control, Magnetism, Vacuum Technique and Ion Sources, as well as techniques that are specific to SPECT/PET: targetry, transfer of liquids and gases, radiochemistry modules, etc. Adjustment and operation of equipment, acceptance tests and service interventions are the principal assignments of the intervention group.</p> <p>The IBA Customer Services works in cooperation with the Engineering Department.</p> <p>The Engineering Department is the "technical memory" of the company. It manages a detailed list of all the individual components that are part of the configurations of each IBA customer. Every part is listed with a number, the drawing reference, precise specifications and the exact location in the tree of the customer's configuration.</p> <p>For each set of equipment, IBA holds a permanent stock of common and wear parts, and thus ensures their immediate availability to the customers.</p> <p>IBA Customer Services provides different levels of service to its customers, ranging from a 24-hour service engineer response call-out to an engineer being available on site on a full-time basis. The service options offered often depend on elements like the customer maintenance budget, the level of competence of its staff, its planning of production, etc. In any case, IBA Customer Services is willing to offer a customized maintenance service meeting the customer's specific requirements.</p> </div> <div> C70-TPD-R06 (09-2008) 53   64 </div>
--	---

<div> Spare Parts &amp; Customer Service </div>	
54   64	

<div> Cyclone® 70 Product description </div> <div> 7.1. Importance of the Customer Services </div> <div> 7.2. Customer Services Organization </div> <div> 7.3. Maintenance Contract/Service Agreement </div>	<div>  </div> <div> <h2>7. Spare Parts &amp; Customer Service</h2> </div> <div> <p>IBA emphasize the importance of an efficient and reliable Customer Services for its customers, from the commercial producers of radioisotopes to, and especially, the users of equipment.</p> <p>Each SPECT/ PET isotope production systems offered and installed by IBA comes with tailored Customer Services service programs, adapted to the resources and needs of the user, and to the demanding requirements attached to the operation and maintenance of a piece of equipment installed in a medical environment.</p> <p>At IBA Customer Services, we listen to customer needs to deliver innovative customized solutions all over the world.</p> <p>Most IBA equipment, especially the numerous Cyclone® 30's used by industrial producers of radio-isotopes, operates 24 hours-a-day, and need rapid intervention from IBA when a functioning problem arises. In this spirit, IBA has developed an organization that ensures the permanent availability of a team of engineers ready to leave within the few hours following a customer's call. For regular breakdown interventions, IBA also resorts to competent local engineers, trained by IBA, whose delay of intervention is still decreased.</p> <p>On the operational point of view, the Customer Services has its own field engineers specialized in Radio Frequency,</p> <p>Control, Magnetism, Vacuum Technique and Ion Sources, as well as techniques that are specific to SPECT/PET: targetry, transfer of liquids and gases, radiochemistry modules, etc. Adjustment and operation of equipment, acceptance tests and service interventions are the principal assignments of the intervention group.</p> <p>The IBA Customer Services works in cooperation with the Engineering Department.</p> <p>The Engineering Department is the "technical memory" of the company. It manages a detailed list of all the individual components that are part of the configurations of each IBA customer. Every part is listed with a number, the drawing reference, precise specifications and the exact location in the tree of the customer's configuration.</p> <p>For each set of equipment, IBA holds a permanent stock of common and wear parts, and thus ensures their immediate availability to the customers.</p> <p>IBA Customer Services provides different levels of service to its customers, ranging from a 24-hour service engineer response call-out to an engineer being available on site on a full-time basis. The service options offered often depend on elements like the customer maintenance budget, the level of competence of its staff, its planning of production, etc. In any case, IBA Customer Services is willing to offer a customized maintenance service meeting the customer's specific requirements.</p> </div> <div> C70-TPD-R06 (09-2008) 53   64 </div>
--	---

<div> Spare Parts &amp; Customer Service </div>	
54   64	





## 8. Documentation

### 8.1. Documentation

Each Cyclone® 70 is delivered with a full set of documentation. This documentation comprises two parts: the operation documentation and the reference documentation.

#### Operation Documentation

The operation documentation includes the Operator's Manual, the Preventive Maintenance Manual and the Troubleshooting Manual.

The Operator's Manual explains the layout and meaning of all control screens, the method for starting up the Cyclone® 70 and the method for obtaining the beam on target, using predetermined beam parameters in the case of routine bombardments or newly determined parameters for non-routine bombardments.

The Service Manual gives the preventive maintenance schedule, and includes all necessary maintenance procedures, as well as basic troubleshooting procedures for diagnosing and correcting the most frequent types of failure.

#### Reference Documentation

The reference documentation includes the general assembly drawings of all the mechanical sub-assemblies of the Cyclone® 70, their conceptual schematics, all supplier documentation, the conceptual schematics of the power supplies and their wiring and component-level drawings, and the list of cables between the different parts of the system.



## 8. Documentation

### 8.1. Documentation

Each Cyclone® 70 is delivered with a full set of documentation. This documentation comprises two parts: the operation documentation and the reference documentation.

#### Operation Documentation

The operation documentation includes the Operator's Manual, the Preventive Maintenance Manual and the Troubleshooting Manual.

The Operator's Manual explains the layout and meaning of all control screens, the method for starting up the Cyclone® 70 and the method for obtaining the beam on target, using predetermined beam parameters in the case of routine bombardments or newly determined parameters for non-routine bombardments.

The Service Manual gives the preventive maintenance schedule, and includes all necessary maintenance procedures, as well as basic troubleshooting procedures for diagnosing and correcting the most frequent types of failure.

#### Reference Documentation

The reference documentation includes the general assembly drawings of all the mechanical sub-assemblies of the Cyclone® 70, their conceptual schematics, all supplier documentation, the conceptual schematics of the power supplies and their wiring and component-level drawings, and the list of cables between the different parts of the system.



## 9. Training program

### 9.1. Training at IBA

IBA's customized training program is a key part of the technology and know-how package transferred to the system user. While at the IBA facility in Louvain-la-Neuve, trainees will benefit from exclusive hands-on training on IBA's own cyclotron. In addition, trainees will also benefit from IBA's privileged link with other institutions. This highly professional training environment ensures that trainees are thoroughly prepared to be efficient cyclotron center operators.

### 9.2. Training on site

To meet specific customer requirements, training sessions are also carried out on site either during or after the cyclotron installation.

A typical training program covers, from a theoretical as well as a practical point of view, the following subjects:

- technical presentation of the different subsystems of the equipment (ion source, magnetic structure, RF extraction, vacuum, targets, transfer of liquids and gases, chemistry modules, cooling system, power supplies, water manifold, control system...)
- start-up and operation procedures of the cyclotron
- how to use IBA documentation
- detailed presentation of the user interface
- troubleshooting procedures for diagnosing and correcting failures of the system
- preventive maintenance tasks, etc....



## 9. Training program

### 9.1. Training at IBA

IBA's customized training program is a key part of the technology and know-how package transferred to the system user. While at the IBA facility in Louvain-la-Neuve, trainees will benefit from exclusive hands-on training on IBA's own cyclotron. In addition, trainees will also benefit from IBA's privileged link with other institutions. This highly professional training environment ensures that trainees are thoroughly prepared to be efficient cyclotron center operators.

### 9.2. Training on site

To meet specific customer requirements, training sessions are also carried out on site either during or after the cyclotron installation.

A typical training program covers, from a theoretical as well as a practical point of view, the following subjects:

- technical presentation of the different subsystems of the equipment (ion source, magnetic structure, RF extraction, vacuum, targets, transfer of liquids and gases, chemistry modules, cooling system, power supplies, water manifold, control system...)
- start-up and operation procedures of the cyclotron
- how to use IBA documentation
- detailed presentation of the user interface
- troubleshooting procedures for diagnosing and correcting failures of the system
- preventive maintenance tasks, etc....

## 10. Dimensions and Examples of Layouts

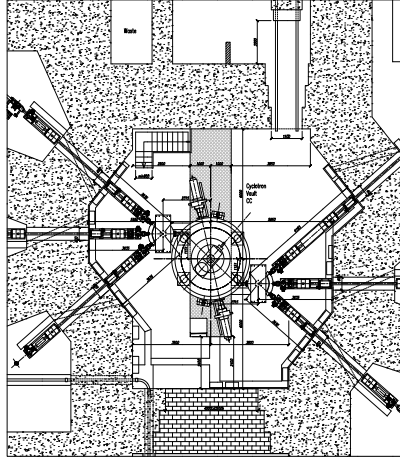


Fig. 18: Cyclone® 70 vault dimensions and equipment entry clearance

## 10. Dimensions and Examples of Layouts

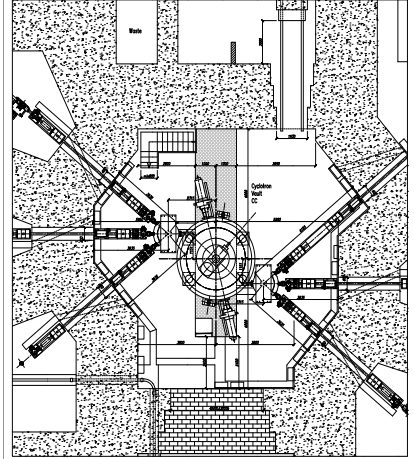


Fig. 18: Cyclone® 70 vault dimensions and equipment entry clearance

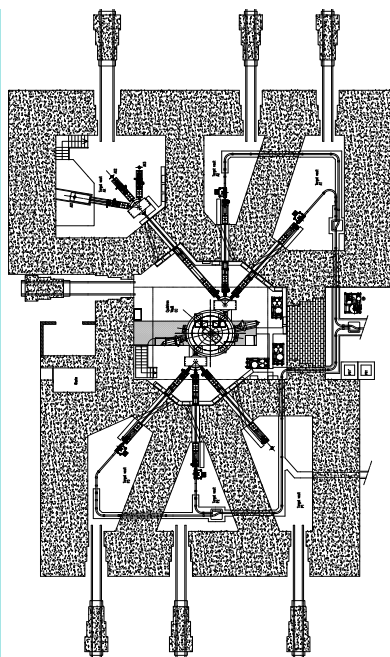


Fig. 19: Cyclone® 70, target vaults, typical layout

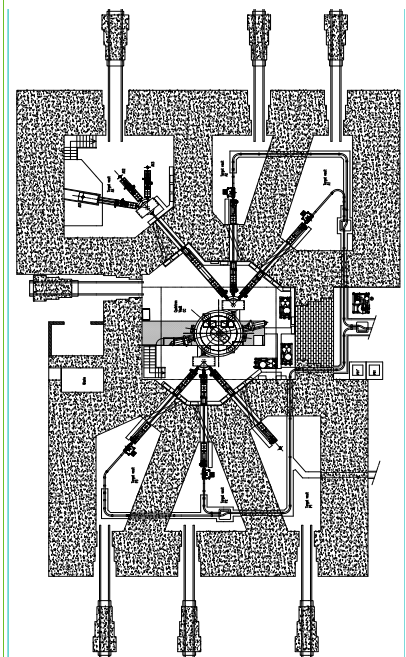


Fig. 19: Cyclone® 70, target vaults, typical layout

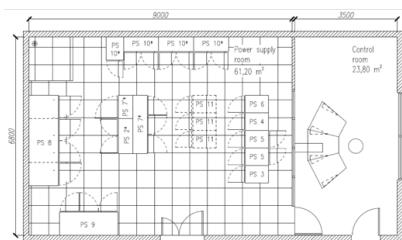


Fig. 20: Power supply room and control room requirement for Cyclone® 70

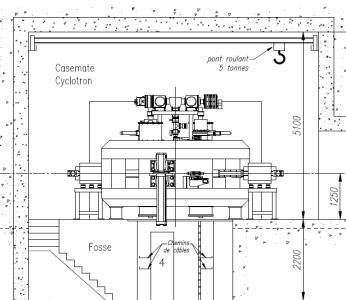


Fig. 21: Elevation view of the cyclotron vault and pit dimension for Cyclone® 70

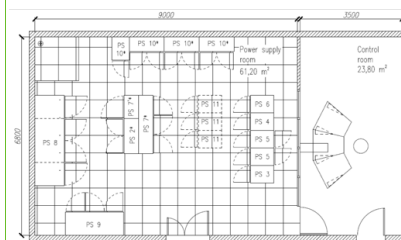


Fig. 20: Power supply room and control room requirement for Cyclone® 70

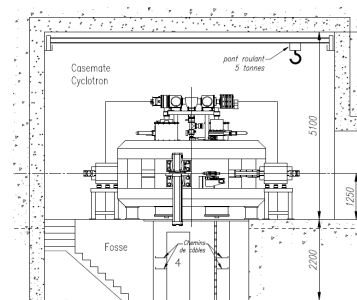


Fig. 21: Elevation view of the cyclotron vault and pit dimension for Cyclone® 70



## 11. References

1. Magnetic field design and calculations for IBA Cyclone® 70; Szymon Zaremba
2. Extraction simulations for IBA Cyclone® 70; Dirk Vandeplassche
3. Injection and central region design for IBA Cyclone® 70; Willem Kleeven
4. Machining and assembly of IBA Cyclone® 70; William Beedman
5. The magnetic field mapping system for IBA Cyclone® 70; Yves Paradis

All papers presented at "18th conference on cyclotrons and their applications 2007"  
October 1-5; 2007 - Giardini Naxos; Italy.



## 11. References

1. Magnetic field design and calculations for IBA Cyclone® 70; Szymon Zaremba
2. Extraction simulations for IBA Cyclone® 70; Dirk Vandeplassche
3. Injection and central region design for IBA Cyclone® 70; Willem Kleeven
4. Machining and assembly of IBA Cyclone® 70; William Beedman
5. The magnetic field mapping system for IBA Cyclone® 70; Yves Paradis

All papers presented at "18th conference on cyclotrons and their applications 2007"  
October 1-5; 2007 - Giardini Naxos; Italy.

Visit us |  
[www.iba-worldwide.com](http://www.iba-worldwide.com)

Contact us |  
E-mail: [info-cyclo@iba-group.com](mailto:info-cyclo@iba-group.com)



**IBA Molecular Europe |**  
Chemin du cyclotron, 3  
1348 Louvain-la-Neuve  
Belgium  
Tel: + 32 10 47 58 58 - Fax: + 32 10 47 59 58

**IBA Molecular North America |**  
100 Executive Dr, Suite 100  
Sterling, VA 20166  
Tel: +1 703 787 7900 - Fax: +1 703-7874079

**IBA Molecular China |**  
No. 6 Xing Guang Er Jie, Beijing OPTO-Mechatronics  
Industrial Park (OIP),  
Tongzhou District, Beijing 101111, P. R. China  
Tel: +86-10-8080 9288 Fax: +86-10-8080 9299

While all care has been taken to ensure that the information contained in this publication is correct, we accept no responsibility for any inaccuracy and reserve the right to modify this information. Technical specifications are based on standard operating conditions and may be subject to variations.

IBAMOLECULAR® Aug 08 | C20305-EN24 | © All rights reserved

Visit us |  
[www.iba-worldwide.com](http://www.iba-worldwide.com)

Contact us |  
E-mail: [info-cyclo@iba-group.com](mailto:info-cyclo@iba-group.com)



**IBA Molecular Europe |**  
Chemin du cyclotron, 3  
1348 Louvain-la-Neuve  
Belgium  
Tel: + 32 10 47 58 58 - Fax: + 32 10 47 59 58

**IBA Molecular North America |**  
100 Executive Dr, Suite 100  
Sterling, VA 20166  
Tel: +1 703 787 7900 - Fax: +1 703-7874079

**IBA Molecular China |**  
No. 6 Xing Guang Er Jie, Beijing OPTO-Mechatronics  
Industrial Park (OIP),  
Tongzhou District, Beijing 101111, P. R. China  
Tel: +86-10-8080 9288 Fax: +86-10-8080 9299

While all care has been taken to ensure that the information contained in this publication is correct, we accept no responsibility for any inaccuracy and reserve the right to modify this information. Technical specifications are based on standard operating conditions and may be subject to variations.

IBAMOLECULAR® Aug 08 | C20305-EN24 | © All rights reserved



# Ficha de Datos de Seguridad

Conforme a la Directiva 91/155/CEE de la Comisión

Fecha de emisión: 15.05.2004  
Reemplaza la emisión del 14.10.2003

## 1. Identificación de la sustancia o del preparado y de la sociedad o empresa

*Identificación de la sustancia o del preparado*

Artículo número: 803978  
Denominación: Ferroceno para síntesis

*Utilización de la sustancia/preparación*

Producto químico para síntesis

*Denominación de la empresa*

Empresa: Merck Schuchardt OHG \* D-85662 Hohenbrunn \* Alemania \*  
Tel: ++49 8102/802-0

Teléfono de urgencias: Instituto Nacional de Toxicología \* Madrid \* Tel: 91 562 04 20

## 2. Composición/información sobre los componentes

*Sinónimos:*

Diciclopentadienhierro, Hierro diciclopentadienilo

Nr.-CAS: 102-54-5  
PM: 186.04 g/mol  
Fórmula molecular:  $C_{10}H_{10}Fe$   
(según Hill)

Número CE: 203-039-3

## 3. Identificación de peligros

Fácilmente inflamable. Nocivo por ingestión. Tóxico para los organismos acuáticos, puede provocar a largo plazo efectos negativos en el medio ambiente acuático.

## 4. Primeros auxilios

Tras inhalación: aire fresco. En caso necesario, respiración por medios instrumentales. Llamar al médico.  
Tras contacto con la piel: aclarar con abundante agua. Eliminar ropa contaminada. Tras contacto con los ojos: aclarar con abundante agua, manteniendo abiertos los párpados. Llamar al oftalmólogo.  
Tras ingestión: Beber abundante agua. Llamar inmediatamente al médico.



# Ficha de Datos de Seguridad

Conforme a la Directiva 91/155/CEE de la Comisión

Fecha de emisión: 15.05.2004  
Reemplaza la emisión del 14.10.2003

## 1. Identificación de la sustancia o del preparado y de la sociedad o empresa

*Identificación de la sustancia o del preparado*

Artículo número: 803978  
Denominación: Ferroceno para síntesis

*Utilización de la sustancia/preparación*

Producto químico para síntesis

*Denominación de la empresa*

Empresa: Merck Schuchardt OHG \* D-85662 Hohenbrunn \* Alemania \*  
Tel: ++49 8102/802-0

Teléfono de urgencias: Instituto Nacional de Toxicología \* Madrid \* Tel: 91 562 04 20

## 2. Composición/información sobre los componentes

*Sinónimos:*

Diciclopentadienhierro, Hierro diciclopentadienilo

Nr.-CAS: 102-54-5  
PM: 186.04 g/mol  
Fórmula molecular:  $C_{10}H_{10}Fe$   
(según Hill)

Número CE: 203-039-3

## 3. Identificación de peligros

Fácilmente inflamable. Nocivo por ingestión. Tóxico para los organismos acuáticos, puede provocar a largo plazo efectos negativos en el medio ambiente acuático.

## 4. Primeros auxilios

Tras inhalación: aire fresco. En caso necesario, respiración por medios instrumentales. Llamar al médico.  
Tras contacto con la piel: aclarar con abundante agua. Eliminar ropa contaminada. Tras contacto con los ojos: aclarar con abundante agua, manteniendo abiertos los párpados. Llamar al oftalmólogo.  
Tras ingestión: Beber abundante agua. Llamar inmediatamente al médico.

## Ficha de Datos de Seguridad Merck

Conforme a la Directiva 91/155/CEE de la Comisión

Artículo número: 803978  
Denominación: Ferroceno para síntesis

### 5. Medidas de lucha contra incendios

Medios de extinción adecuados:  
CO<sub>2</sub>, espuma, polvo.

Riesgos especiales:  
Combustible. En caso de incendio posible formación de gases de combustión o vapores peligrosos. Son posibles mezclas explosivas con el aire a temperaturas normales.

Equipo de protección especial para el personal de lucha contra incendios:  
Permanencia en el área de riesgo sólo con sistemas de respiración artificiales e independientes del ambiente. Protección de la piel mediante observación de una distancia de seguridad y uso de ropa protectora adecuada.

Referencias adicionales:  
Evitar la penetración del agua de extinción en acuíferos superficiales o subterráneos.

### 6. Medidas a tomar en caso de vertido accidental

Medidas de precaución relativas a las personas:  
Evitar la inhalación de polvo. Evitar el contacto con la sustancia. Proceder a ventilación en lugares cerrados.

Medidas de protección del medio ambiente:  
No incorporar a la canalización del desagüe; ¡Riesgo de explosión!

Procedimientos de recogida/limpieza:  
Recoger en seco y proceder a la eliminación de residuos. Aclarar. Evitar la formación de polvo.

### 7. Manipulación y almacenamiento

*Manipulación:*

Observaciones sobre la protección de incendios y explosiones:  
Mantener alejado de fuentes de ignición. Evitar la carga electrostática.

*Almacenamiento:*

Bien cerrado y alejado de fuentes de ignición y de calor. Seco. De +15°C a +25°C.

### 8. Controles de exposición/protección personal

*Protección personal:*

Los tipos de auxiliares para protección del cuerpo deben elegirse específicamente según el puesto de trabajo en función de la concentración y cantidad de la sustancia peligrosa. Debería aclararse con el suministrador la estabilidad de los medios protectores frente a los productos químicos.

Protección respiratoria: necesaria en presencia de polvo. Filtro P 3

Protección de los ojos: precisa

## Ficha de Datos de Seguridad Merck

Conforme a la Directiva 91/155/CEE de la Comisión

Artículo número: 803978  
Denominación: Ferroceno para síntesis

### 5. Medidas de lucha contra incendios

Medios de extinción adecuados:  
CO<sub>2</sub>, espuma, polvo.

Riesgos especiales:  
Combustible. En caso de incendio posible formación de gases de combustión o vapores peligrosos. Son posibles mezclas explosivas con el aire a temperaturas normales.

Equipo de protección especial para el personal de lucha contra incendios:  
Permanencia en el área de riesgo sólo con sistemas de respiración artificiales e independientes del ambiente. Protección de la piel mediante observación de una distancia de seguridad y uso de ropa protectora adecuada.

Referencias adicionales:  
Evitar la penetración del agua de extinción en acuíferos superficiales o subterráneos.

### 6. Medidas a tomar en caso de vertido accidental

Medidas de precaución relativas a las personas:  
Evitar la inhalación de polvo. Evitar el contacto con la sustancia. Proceder a ventilación en lugares cerrados.

Medidas de protección del medio ambiente:  
No incorporar a la canalización del desagüe; ¡Riesgo de explosión!

Procedimientos de recogida/limpieza:  
Recoger en seco y proceder a la eliminación de residuos. Aclarar. Evitar la formación de polvo.

### 7. Manipulación y almacenamiento

*Manipulación:*

Observaciones sobre la protección de incendios y explosiones:  
Mantener alejado de fuentes de ignición. Evitar la carga electrostática.

*Almacenamiento:*

Bien cerrado y alejado de fuentes de ignición y de calor. Seco. De +15°C a +25°C.

### 8. Controles de exposición/protección personal

*Protección personal:*

Los tipos de auxiliares para protección del cuerpo deben elegirse específicamente según el puesto de trabajo en función de la concentración y cantidad de la sustancia peligrosa. Debería aclararse con el suministrador la estabilidad de los medios protectores frente a los productos químicos.

Protección respiratoria: necesaria en presencia de polvo. Filtro P 3

Protección de los ojos: precisa



Ficha de Datos de Seguridad Merck

Conforme a la Directiva 91/155/CEE de la Comisión

Artículo número:	803978
Denominación:	Ferroceno para síntesis

Protección de las manos:	Para contacto pleno: Guantes: Caucho nitrilo Espesor: 0.11 mm Tiempo de penetración: > 480 Min.  En caso de salpicaduras: Guantes: Caucho nitrilo Espesor: 0.11 mm Tiempo de penetración: > 480 Min.  Los guantes de protección indicados deben cumplir con las especificaciones de la Directiva 89/686/EEC y con su norma resultante EN374, por ejemplo KCL 740 Dermatril® (Sumerción), 740 Dermatril® (Salpicaduras). Los tiempos de ruptura mencionados anteriormente han sido determinados con muestras de material de los tipos de guantes recomendados en mediciones de laboratorio de KCL según EN374. Esta recomendación solo es válida para el producto mencionado en la ficha de datos de seguridad, suministrado por nosotros y para el fin indicado. Al disolver o mezclar en otras sustancias y cuando las condiciones difieran de las indicadas en EN374, debe dirigirse al suministrador de guantes con distintivo CE (por ejem. KCL GmbH, D-36124 Eichenzell, Internet: www.kcl.de)
Medidas de higiene particulares: Sustituir la ropa contaminada. Se recomienda protección preventiva de la piel. Lavar manos y cara al finalizar el trabajo.	

9. Propiedades físicas y químicas

Estado físico:	cristales		
Color:	amarillo anaranjado		
Olor:	aromático		
Valor pH		no disponible	
Punto de fusión		172-175	°C
Punto de ebullición		249	°C
Temperatura de ignición		> 150	°C
Punto de inflamación		no disponible	
Límite de explosión	bajo	no disponible	
	alto	no disponible	
Presión de vapor	(100 °C)	3.4	hPa
Densidad	(20 °C)	1.49	g/cm <sup>3</sup>
Densidad de amontonamiento		~ 500	kg/m <sup>3</sup>
Solubilidad en			
Agua	(20 °C)	insoluble	
Descomposición térmica		> 460	°C
log P(oc/ag):		3.28	(calculado)

Ficha de Datos de Seguridad Merck

Conforme a la Directiva 91/155/CEE de la Comisión

Artículo número:	803978
Denominación:	Ferroceno para síntesis

Protección de las manos:	Para contacto pleno: Guantes: Caucho nitrilo Espesor: 0.11 mm Tiempo de penetración: > 480 Min.  En caso de salpicaduras: Guantes: Caucho nitrilo Espesor: 0.11 mm Tiempo de penetración: > 480 Min.  Los guantes de protección indicados deben cumplir con las especificaciones de la Directiva 89/686/EEC y con su norma resultante EN374, por ejemplo KCL 740 Dermatril® (Sumerción), 740 Dermatril® (Salpicaduras). Los tiempos de ruptura mencionados anteriormente han sido determinados con muestras de material de los tipos de guantes recomendados en mediciones de laboratorio de KCL según EN374. Esta recomendación solo es válida para el producto mencionado en la ficha de datos de seguridad, suministrado por nosotros y para el fin indicado. Al disolver o mezclar en otras sustancias y cuando las condiciones difieran de las indicadas en EN374, debe dirigirse al suministrador de guantes con distintivo CE (por ejem. KCL GmbH, D-36124 Eichenzell, Internet: www.kcl.de)
Medidas de higiene particulares: Sustituir la ropa contaminada. Se recomienda protección preventiva de la piel. Lavar manos y cara al finalizar el trabajo.	

9. Propiedades físicas y químicas

Estado físico:	cristales		
Color:	amarillo anaranjado		
Olor:	aromático		
Valor pH		no disponible	
Punto de fusión		172-175	°C
Punto de ebullición		249	°C
Temperatura de ignición		> 150	°C
Punto de inflamación		no disponible	
Límite de explosión	bajo	no disponible	
	alto	no disponible	
Presión de vapor	(100 °C)	3.4	hPa
Densidad	(20 °C)	1.49	g/cm <sup>3</sup>
Densidad de amontonamiento		~ 500	kg/m <sup>3</sup>
Solubilidad en			
Agua	(20 °C)	insoluble	
Descomposición térmica		> 460	°C
log P(oc/ag):		3.28	(calculado)

Ficha de Datos de Seguridad Merck

Conforme a la Directiva 91/155/CEE de la Comisión

Artículo número: 803978  
Denominación: Ferroceno para síntesis

10. Estabilidad y reactividad

*Condiciones a evitar*  
Fácilmente inflamable por acción breve de una fuente de ignición.

*Materias a evitar*  
Posibles reacciones violentas con: percloratos, oxidantes fuertes.

*Productos de descomposición peligrosos*  
información no disponible

*Información complementaria*  
fácilmente inflamable;  
En estado gaseoso/vapor existe riesgo de explosión con el aire.  
sublimable.

11. Información toxicológica

*Toxicidad aguda*  
  
LD<sub>50</sub> (dérmica, rata): >3000 mg/kg.  
LD<sub>50</sub> (oral, rata): 1320 mg/kg.

*Toxicidad subaguda a crónica*  
Sensibilización:  
Test de sensibilización (cobaya): Sin efecto sensibilizante.

Mutagenicidad (ensayo de células de mamífero): negativa. (in vitro)

*Informaciones adicionales sobre toxicidad*  
Tras inhalación: Irritación de las mucosas, tos y dificultad para respirar.  
Tras contacto con los ojos: leves irritaciones.  
Tras ingestión, pueden quedar lesiones: esófago, estómago, intestinos.

*Información complementaria*  
No pueden excluirse otras características peligrosas.  
El producto debe manejarse con las precauciones apropiadas para los productos químicos.

Ficha de Datos de Seguridad Merck

Conforme a la Directiva 91/155/CEE de la Comisión

Artículo número: 803978  
Denominación: Ferroceno para síntesis

10. Estabilidad y reactividad

*Condiciones a evitar*  
Fácilmente inflamable por acción breve de una fuente de ignición.

*Materias a evitar*  
Posibles reacciones violentas con: percloratos, oxidantes fuertes.

*Productos de descomposición peligrosos*  
información no disponible

*Información complementaria*  
fácilmente inflamable;  
En estado gaseoso/vapor existe riesgo de explosión con el aire.  
sublimable.

11. Información toxicológica

*Toxicidad aguda*  
  
LD<sub>50</sub> (dérmica, rata): >3000 mg/kg.  
LD<sub>50</sub> (oral, rata): 1320 mg/kg.

*Toxicidad subaguda a crónica*  
Sensibilización:  
Test de sensibilización (cobaya): Sin efecto sensibilizante.

Mutagenicidad (ensayo de células de mamífero): negativa. (in vitro)

*Informaciones adicionales sobre toxicidad*  
Tras inhalación: Irritación de las mucosas, tos y dificultad para respirar.  
Tras contacto con los ojos: leves irritaciones.  
Tras ingestión, pueden quedar lesiones: esófago, estómago, intestinos.

*Información complementaria*  
No pueden excluirse otras características peligrosas.  
El producto debe manejarse con las precauciones apropiadas para los productos químicos.

## Ficha de Datos de Seguridad Merck

Conforme a la Directiva 91/155/CEE de la Comisión

Artículo número: 803978  
Denominación: Ferroceno para síntesis

### 12. Informaciones ecológicas

Biodegradabilidad:  
Biodegradabilidad:: 60 % /28 d.  
Difícilmente biodegradable.

Comportamiento en compartimentos ecológicos:  
Reparto: log P(oct): 3.28 (calculado).  
Es de esperar un notable potencial de bioacumulación (log P(o/w) >3).

Efectos ecotóxicos:  
Efectos biológicos:  
Tóxico para organismos acuáticos. Puede provocar a largo plazo efectos negativos en el medio ambiente acuático.

Toxicidad de dafnia: Daphnia CE<sub>50</sub>: 1.5-2.6 mg/l /48 h.  
Daphnia magna NOEC: <0.002 mg/l /21 d.  
Toxicidad para las algas: algas CE<sub>50</sub>: 2.4-3.8 mg/l /72 h.  
Toxicidad para los peces: peces LC<sub>50</sub>: 24.5 mg/l /96 h.

Otras observaciones ecológicas:  
¡No incorporar a suelos ni acuíferos!

### 13. Consideraciones relativas a la eliminación

#### Producto:

Los productos químicos han de eliminarse siguiendo las normativas nacionales. Bajo [www.retrologistik.de](http://www.retrologistik.de) encontrará indicaciones sobre países, indicaciones específicas de productos así como contactos.

#### Embalaje:

Los envases de productos Merck han de eliminarse siguiendo las normativas nacionales. Bajo [www.retrologistik.de](http://www.retrologistik.de) encontrará indicaciones especiales para las peculiaridades nacionales así como contactos

### 14. Información relativa al transporte

Transporte terrestre ADR, RID  
UN 1325 ENTZUENDARER ORGANISCHER FESTER STOFF, N.A.G. (FERROCEN), 4.1, II

Transporte fluvial ADN, ADNR no ensayado

Transporte marítimo IMDG-Code  
UN 1325 FLAMMABLE SOLID, ORGANIC, N.O.S. (FERROCENE), 4.1, II  
EmS: F-A S-G

Transporte aéreo CAO, PAX  
FLAMMABLE SOLID, ORGANIC, N.O.S. (FERROCENE), 4.1, UN 1325, II

Las informaciones relativas al transporte se mencionan de acuerdo a la reglamentación internacional y en la forma como se aplican en Alemania . Pueden existir posibles diferencias a nivel nacional en otros países comunitarios.

## Ficha de Datos de Seguridad Merck

Conforme a la Directiva 91/155/CEE de la Comisión

Artículo número: 803978  
Denominación: Ferroceno para síntesis

### 12. Informaciones ecológicas

Biodegradabilidad:  
Biodegradabilidad:: 60 % /28 d.  
Difícilmente biodegradable.

Comportamiento en compartimentos ecológicos:  
Reparto: log P(oct): 3.28 (calculado).  
Es de esperar un notable potencial de bioacumulación (log P(o/w) >3).

Efectos ecotóxicos:  
Efectos biológicos:  
Tóxico para organismos acuáticos. Puede provocar a largo plazo efectos negativos en el medio ambiente acuático.

Toxicidad de dafnia: Daphnia CE<sub>50</sub>: 1.5-2.6 mg/l /48 h.  
Daphnia magna NOEC: <0.002 mg/l /21 d.  
Toxicidad para las algas: algas CE<sub>50</sub>: 2.4-3.8 mg/l /72 h.  
Toxicidad para los peces: peces LC<sub>50</sub>: 24.5 mg/l /96 h.

Otras observaciones ecológicas:  
¡No incorporar a suelos ni acuíferos!

### 13. Consideraciones relativas a la eliminación

#### Producto:

Los productos químicos han de eliminarse siguiendo las normativas nacionales. Bajo [www.retrologistik.de](http://www.retrologistik.de) encontrará indicaciones sobre países, indicaciones específicas de productos así como contactos.

#### Embalaje:

Los envases de productos Merck han de eliminarse siguiendo las normativas nacionales. Bajo [www.retrologistik.de](http://www.retrologistik.de) encontrará indicaciones especiales para las peculiaridades nacionales así como contactos

### 14. Información relativa al transporte

Transporte terrestre ADR, RID  
UN 1325 ENTZUENDARER ORGANISCHER FESTER STOFF, N.A.G. (FERROCEN), 4.1, II

Transporte fluvial ADN, ADNR no ensayado

Transporte marítimo IMDG-Code  
UN 1325 FLAMMABLE SOLID, ORGANIC, N.O.S. (FERROCENE), 4.1, II  
EmS: F-A S-G

Transporte aéreo CAO, PAX  
FLAMMABLE SOLID, ORGANIC, N.O.S. (FERROCENE), 4.1, UN 1325, II

Las informaciones relativas al transporte se mencionan de acuerdo a la reglamentación internacional y en la forma como se aplican en Alemania . Pueden existir posibles diferencias a nivel nacional en otros países comunitarios.

Ficha de Datos de Seguridad Merck

Conforme a la Directiva 91/155/CEE de la Comisión

Artículo número:	803978
Denominación:	Ferroceno para síntesis

15. Información reglamentaria

Etiquetado según Directivas de la CEE		
Pictograma:	F	Fácilmente inflamable
	Xn	Nocivo
	N	Peligroso para el medio ambiente
Frases R:	11-22-51/53	Fácilmente inflamable. Nocivo por ingestión. Tóxico para los organismos acuáticos, puede provocar a largo plazo efectos negativos en el medio ambiente acuático.
Frases S:	22-61	No respirar el polvo. Evítese su liberación al medio ambiente. Recábense instrucciones específicas de la ficha de datos de seguridad.
Etiquetado reducido(1999/45/CE,art.10,4)		
Pictograma:	F	Fácilmente inflamable
	Xn	Nocivo
	N	Peligroso para el medio ambiente
Frases R:	22	Nocivo por ingestión.
Frases S:	---	

16. Otras informaciones

Razón de revisión	
Cambio en el capítulo de primeros auxilios.	
Cambio/completado en el capítulo 5.	
Cambio/completado en el capítulo 8.	
Cambio en el capítulo de toxicología.	
Cambio en el capítulo de ecología	
Revisión general.	
Representante regional:	
VWR International S.L. * Apartado 48 * E-08100 Mollet del Valles * Tel.: +34 (0) 93 5655 500 *	
Fax: +34 (0) 93 5440 000	
Merck Farma y Química, S.A. * Apartado 47 * E-08100 Mollet del Valles * Tel.: +34 (0) 93 5655 500	
* Fax: +34 (0) 93 5440 000	

Los datos suministrados en ésta ficha de seguridad se basan a nuestro actual conocimiento. Describen tan sólo las medidas de seguridad en el manejo de éste producto y no representan una garantía sobre las propiedades descritas del mismo.

Ficha de Datos de Seguridad Merck

Conforme a la Directiva 91/155/CEE de la Comisión

Artículo número:	803978
Denominación:	Ferroceno para síntesis

15. Información reglamentaria

Etiquetado según Directivas de la CEE		
Pictograma:	F	Fácilmente inflamable
	Xn	Nocivo
	N	Peligroso para el medio ambiente
Frases R:	11-22-51/53	Fácilmente inflamable. Nocivo por ingestión. Tóxico para los organismos acuáticos, puede provocar a largo plazo efectos negativos en el medio ambiente acuático.
Frases S:	22-61	No respirar el polvo. Evítese su liberación al medio ambiente. Recábense instrucciones específicas de la ficha de datos de seguridad.
Etiquetado reducido(1999/45/CE,art.10,4)		
Pictograma:	F	Fácilmente inflamable
	Xn	Nocivo
	N	Peligroso para el medio ambiente
Frases R:	22	Nocivo por ingestión.
Frases S:	---	

16. Otras informaciones

Razón de revisión	
Cambio en el capítulo de primeros auxilios.	
Cambio/completado en el capítulo 5.	
Cambio/completado en el capítulo 8.	
Cambio en el capítulo de toxicología.	
Cambio en el capítulo de ecología	
Revisión general.	
Representante regional:	
VWR International S.L. * Apartado 48 * E-08100 Mollet del Valles * Tel.: +34 (0) 93 5655 500 *	
Fax: +34 (0) 93 5440 000	
Merck Farma y Química, S.A. * Apartado 47 * E-08100 Mollet del Valles * Tel.: +34 (0) 93 5655 500	
* Fax: +34 (0) 93 5440 000	

Los datos suministrados en ésta ficha de seguridad se basan a nuestro actual conocimiento. Describen tan sólo las medidas de seguridad en el manejo de éste producto y no representan una garantía sobre las propiedades descritas del mismo.



## Specification

<http://certificates.merck.de>

Date of print: 08.01.2010

8.03978.0050 Ferrocene for synthesis

	Spec. Values	
Assay (GC, area%)	≥ 98	%
Melting range		
lower value	≥ 172	°C
upper value	≤ 175	°C
Identity (IR)	passes test	

Dr. Wolfgang Bolkart

responsible laboratory manager quality control

*This document has been produced electronically and is valid without a signature*



## Specification

<http://certificates.merck.de>

Date of print: 08.01.2010

8.03978.0050 Ferrocene for synthesis

	Spec. Values	
Assay (GC, area%)	≥ 98	%
Melting range		
lower value	≥ 172	°C
upper value	≤ 175	°C
Identity (IR)	passes test	

Dr. Wolfgang Bolkart

responsible laboratory manager quality control

*This document has been produced electronically and is valid without a signature*